

# クェーサー吸収線で探る活動銀河核



三 澤 透

〈ペンシルベニア州立大学・天文および天体物理学科

525 Davey Lab, University Park, PA 16802, USA〉

e-mail: misawa@astro.psu.edu

銀河の中心部に希に見つかる極端に明るい天体「クェーサー」。そのスペクトル上に検出される数多くの吸収構造のことを「クェーサー吸収線」と呼びます。線幅の広い吸収線が、クェーサー内部で作られると考えられているのに対し、線幅の狭い吸収線は、私たちとクェーサーの間に存在する銀河、あるいは銀河間物質によってもたらされると長らく考えられてきました。私たちは、高分散スペクトルデータをもとに、幅の狭い吸収線の中にもクェーサーと関係のあるものが含まれていることを突き止めました。また、HS1603+3820という特殊な吸収構造をもつことで知られるクェーサーをすばる望遠鏡でモニター観測することにより、その吸収構造に激しい時間変動を見つけました。これらの観測結果をもとに、現在までに提唱されている降着円盤からのアウトフローモデルとの比較を試みました。このアウトフローガスは、クェーサーの活動を持続させるのに邪魔になる角運動量を、降着円盤から抜き出す役割を果たすだけでなく、近傍の星間・銀河間物質の星形成活動や金属汚染に多大なる影響を与えるため、その重要性は計り知れません。

## 1. はじめに

突然ですが、みなさんにとって思い入れのある天体はありますか？

冬の空に瞬くオリオン座の三つ星、アンドロメダ銀河の美しい渦巻き模様、そして人生に一度だけ目にすることができるハレー彗星の姿……。日頃、直接天文学に携わっていない人でも、夜空に輝く星々に、一つや二つの思い出はあるのではないのでしょうか。かく言う私もハレー彗星との出会いが天文学を志すことになった最初のきっかけ。そして現在、アメリカで研究する私をこの地に導いたのも、ある変わった天体との出会いによるものでした。

## 2. クェーサーは有名、吸収線は？

「大学では何を研究しているの？」

校内・学外を問わず、知り合った友人によく聞かれる質問です。

私が「クェーサー」と答えると、その言葉は耳にしたことがあるらしく、皆さん話の続きを聞きたがります。調子にのった私が「吸収線」と続けると、さっきの興味はどこへやら、たちまち会話は収束方向へ。クェーサーは有名、吸収線は無名？ 読者のみなさんはいかがでしょう？ この記事を読んだ後に、みなさんの吸収線に対するイメージが変わってくれたら、こんなにうれしいことはありません。

宇宙に無数に存在する銀河。その中心部にときどき見つかる極端に明るい中心領域。活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) と呼ばれるこのような天体の中で、最も明るいグループに属するものはクェーサー (Quasar; QSO) と呼ばれ、その明るさは銀河全体にある星の明るさの 100–1,000

倍にも達します<sup>1)</sup>。星々の明るさをはるかに凌駕するこの莫大なエネルギー放出は、一体どのように供給されているのでしょうか？ 銀河中心部には大質量ブラックホール (Black Hole; BH) が存在し、その近くにあるガスなどの物質が BH に引き込まれることによる重力エネルギーの解放が、QSO に莫大なエネルギーを供給している、というのが現在広く受け入れられているアイデアです。発見以来ほぼ半世紀、いまだ謎の多いこの天体の秘密のバールをはがすべく、近傍にあるもの (比較的暗いものはセイファート銀河と呼ばれ、分類上区別されています) から遠方 (すなわち宇宙初期) にあるものまで、さまざまな波長域で研究されてきました<sup>2)~4)</sup>。

また QSO は、手前に存在する暗い天体をスペクトル上で「吸収線」として検出するための背景光源としても使われてきました。これがいわゆる「クエーサー吸収線」と呼ばれるものです。吸収線のもととなる天体 (すなわち吸収体) の候補としては、QSO と私たちの間に介在するもの (例えば、銀河を取り巻くガス、暗い銀河<sup>5)</sup>、銀河間物質など) だけでなく、QSO に直接付随するもの (降着円盤から吹き出すガスなど、後述。) が挙げられます。吸収線業界では、前者を「intervening」吸収線、後者を「intrinsic」吸収線と区別して呼んでいますが、本稿ではそれぞれ「介在吸収線<sup>\*1)</sup>」、「付随吸収線」と呼ぶことにします。

さらに QSO 吸収線は、その見た目の形状からも三つのグループに分けられます (図 1)。線幅が非常に広く (視線速度幅にして 2,000~30,000 km/s) 滑らかな吸収構造をもつ「広吸収線 (Broad Absorption Line; BAL)」<sup>7)</sup>、線幅が狭く (同 500 km/s 程度以下) でこぼこしている「狭吸収線 (Narrow Absorption Line; NAL)」<sup>9)</sup>、そして両者の中間的性質を持つ「準広吸収線 (mini-BAL)」です<sup>10)</sup>。BAL や mini-BAL の大きな線幅が、容易に QSO 近傍

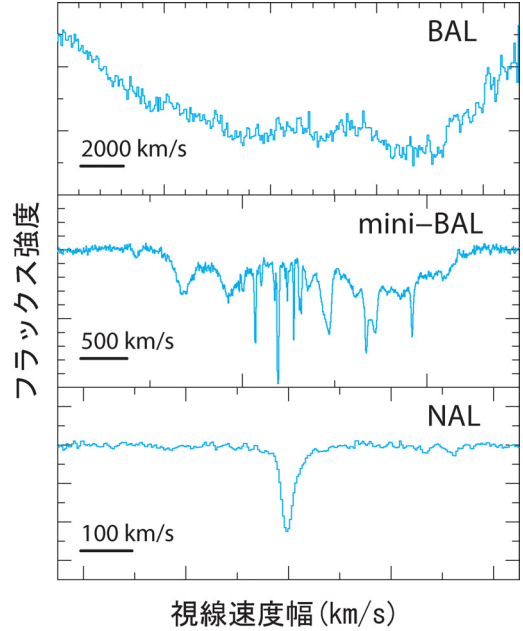


図 1 線幅によって分類される、QSO 吸収線の三つのカテゴリー。BAL は SDSS で取得された CIV 吸収線の合成スペクトル<sup>7)</sup>。Mini-BAL はすばる望遠鏡で取得された HS1603+3820 の CIV 吸収線<sup>8)</sup>。NAL はケック望遠鏡で取得された HS1700+6416 の NV 吸収線<sup>9)</sup>。各パネルに表示された目盛りを見れば、線幅の違いがよくわかります。

における巨視的なガスの運動を連想させるのに対し、熱的運動による効果のみでその線幅が再現可能な NAL については、銀河・銀河間物質によってもたらされる介在吸収線であると考えられてきました。QSO の研究には BAL (mini-BAL) を、銀河・銀河間物質の研究には NAL を、これが今までの常識でした。ところが近年の分光観測により、NAL の中にも付随吸収線が含まれている可能性が示唆され始めたのです。

### 3. NAL は誰の子？

#### —高分散分光観測による挑戦—

そもそも一部の NAL が付随吸収線であると思

\*1 詳細は 2000 年の天文月報の記事をご覧ください<sup>6)</sup>。

われ始めたきっかけは何でしょうか？ それは、炭素の3回電離イオン(C IV)ガスによるNALの数が、QSOの近傍で有意に増加するという統計解析の結果によるものでした<sup>11), 12)</sup>。QSOから吹き出すガスがこの超過に寄与しているに違いない。しかしこの段階ではまだまだ証拠不十分。(1) QSO近傍では、電離ポテンシャルの低い中性水素(H I)吸収線の数が逆に減少することからガスの電離状態が高まり、電離ポテンシャルの高いC IVが相対的に存在しやすい環境にあること(近接効果)<sup>13), 14)</sup>、(2) QSO(特に電波強度の強いQSO)の近傍に、しばしば銀河のクラスタリングが検出されたこと<sup>15), 16)</sup>など、介在吸収線説の勢いのある反対尋問に付随吸収線説は屈しかけました。と、そこへ強力な支持者が現れます。それは、背後にあるQSOの物理的性質(電波強度、スペクトルの形状など)によって、その視線上で検出されるC IVのNALの数に有意に差があるという観測結果<sup>17), 18)</sup>です。もしすべての吸収体がQSOと無関係であれば、吸収線は一樣に分布するはずですが。この結果は介在吸収線説にとってはなかなか手ごわく、結局一部のNALが付随吸収線であることが受け入れられるようになりました。

さて、このQSO視線上で検出される吸収線数の差が、すべてQSO近傍のガスによるものであると考えると、およそ36%のNALが付随吸収線であることをほのめかします。しかしこの結果は付随吸収線としてのNAL(以下、付随NAL)の存在を示唆するだけで、具体的にどのNALが付随吸収線なのかまでは同定していません。低分散分光データ(波長分解能、数千)の限界です。さあ、ここからが本番。いよいよ高分散分光観測

(同、数万)によるNALの同定作業が始まります。と、ここで筆者の興奮をよそに、「付随吸収線として信頼できるBALという道具があるのに、なぜそこまでしてNALにこだわるのか？」という疑問を抱く読者の方がいらっしゃるかもしれません。そこで、NALを研究する理由を明確にしておきたいと思います。

実は、付随NALはBALに対して二つの大きな利点をもっているのです。一つ目の利点は、NALは線幅が狭いので吸収線どうしの混合が起こらないこと。各吸収成分をモデル<sup>\*2</sup>でフィットすることにより、吸収体の柱密度<sup>\*3</sup>、速度幅<sup>\*4</sup>、吸収線の位置<sup>\*5</sup>、そして掩蔽率<sup>\*6</sup>を評価することが可能です。吸収成分が連続的に連なり、ときには完全にフラックスを吸収してしまうBALでは、モデルフィットはほぼ不可能です。もう一つの利点は、BALが電波強度の弱いQSOで多く検出される<sup>20)</sup>のに対し、NALはQSOの性質によらずに幅広く検出されること。吸収線とQSOの性質を比較するうえで、この特徴は魅力的です。

それではなぜ、これほどまでに利点の多い付随NALに多くの注意が払われてこなかったのでしょうか？ それは前述したように、介在吸収線との区別が困難であったからにはほかありません。現在までに、付随NALを同定するさまざまな手法が提案されていますが、QSOの高分散分光観測が可能になった現在、最も信頼できる手法は以下に述べる「部分掩蔽解析」と「時間変動解析」に集約されるでしょう。

**部分掩蔽解析—C IV $\lambda$ 1548, 1551**をはじめとする二重共鳴吸収線は、原子物理理論によりその吸収強度(すなわち光学的厚さ)の比が常に2:1に

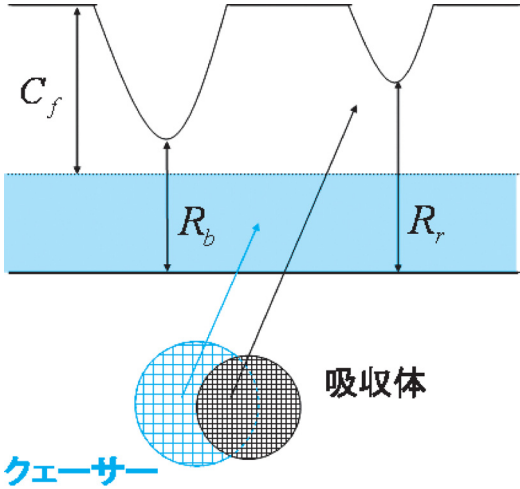
\*2 熱運動によるドップラー成分と、量子力学的効果をもとにしたローレンツ成分を考慮に入れたVoigt Profileというプロファイルを使います<sup>19)</sup>。

\*3 視線方向に対して積分した単位面積あたりのガスの空間数密度。

\*4 熱運動を考慮すれば、ガス温度の上限が得られます。

\*5 QSOからの視線速度差に対応します。

\*6 視線方向に対して、吸収体が背景QSOを覆う比率。後述。



$$C_f = \frac{(R_r - 1)^2}{R_b - 2R_r + 1}$$

図2 部分掩蔽が起きている吸収線の模式図。吸収体に覆われていない部分のフラックスが、吸収線を薄めることにより、C IVなどの二重吸収線の強度比が2よりも小さくなる。R<sub>b</sub>, R<sub>r</sub>は、規格化されたスペクトルにおける、二重吸収線の各成分の残余フラックス。吸収体がQSOを覆う掩蔽率は、図中の式により、R<sub>b</sub>とR<sub>r</sub>のみから評価することができます。

なることが期待されます。ところが一部の吸収線で、この比が2よりも小さくなることが知られており、これは吸収体が背景光源であるQSOを視線方向に対して完全に覆っていないために、フラックスの漏れ出しがあるからだと考えられています<sup>21), 22)</sup> (図2)。介在吸収線に対応するC IVガスの大きさは数キロパーセクにも及ぶと考えられ

ているため<sup>23)</sup>、背景光源を完全に遮蔽し、フラックスの漏れだしをおこしません<sup>\*</sup>。この場合、QSOのごく近傍に存在する、QSOと同等なサイズをもつ塊状の吸収体を考えるのが適当でしょう。ちなみに吸収体が視線方向に対してQSOを覆っている比率(掩蔽率)は、規格化されたスペクトル上における二重吸収線の各成分の残余フラックスのみから評価することが可能です(図2)。掩蔽率が1よりも小さく評価されれば、付随NALの候補ということになります。

時間変動解析—吸収線の形状(深さ, 幅, 位置など)に数年スケールでの時間変動が見られる場合、付随吸収線である可能性が高いといえます。時間変動をもたらす最も単純な要因は、吸収体がQSOに対する私たちの視線を横切ること。キロパーセクスケールのサイズをもつ吸収体の場合、仮に銀河団の典型的な速度分散である1,000 km/sの運動を仮定しても、私たちの視線を横切るのにおよそ100万年かかります。また、吸収体内部の電離状態の変化も時間変動の原因となります。例えばC IVイオンの場合、再結合(C IV→C III)や、再電離(C IV→C V)により、その吸収強度が変化します。この変化のタイムスケールはガスの空間密度に大きく依存します<sup>\*\*</sup>が、典型的な介在吸収線の場合、ガスの空間密度が低いため、対応する時間スケールがやはり100万年以上と評価されます。このように吸収線に時間変動が見られた場合も付随吸収線と考えるのが自然です<sup>\*\*</sup>。

#### 4. 吸収線に隠されたQSOからのメッセージを聞く

高分散分光観測により付随NALの検出を報告

\*<sup>7</sup> ちなみにQSOのスケールは、広輝線領域を含めてもたかだか数パーセクです。

\*<sup>8</sup> 再結合のタイムスケールは $t \sim 1/(\alpha \times n_e)$ で評価されます。ここで $n_e$ は電子密度、 $\alpha$ は再結合定数。例えばC IVからC IIIへの再結合の場合、 $\alpha$ は $5.3 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ という値をとります。

\*<sup>9</sup> ただし、電離状態の低い介在吸収線については、対応する吸収体のスケールが数パーセク以下と見積もられているものもあり<sup>24)</sup>、介在吸収線でありながら時間変動を示す可能性が残されています。マグネシウム1回電離イオン(Mg II)による吸収線などがこれにあたります。本稿では高電離イオンのみを対象にしていますので、この可能性は考慮しません。

する論文がちらほらと見られるようになったのが、ケック望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡の高分散分光器による成果が出始めた 1990 年代後半。私がこの分野に強い興味を抱ききっかけになった論文<sup>21), 25)</sup>を Fred Hamann 氏が発表したのもこの時期です<sup>\*10</sup>。その後も続々と付随 NAL の検出を知らせる結果が報告されるようになります<sup>22), 27), 28)</sup>が、QSO の高分散スペクトルは、必要とされる観測時間の長さから取得するのが容易ではなく、その統計的性質に関しては何もわからないという状態が長く続きました。

2003 年春、HI 吸収線の統計的性質の研究で博士論文<sup>29)</sup>をまとめた私は、この研究で用いたデータ<sup>\*11</sup>が、そのまま付随吸収線の研究にも使えることに気づき、渡米後、ペンシルベニア州立大学の研究室<sup>\*12</sup>のメンバーとともにその解析に着手しました。

幸い、私たちのグループは非常にすぐれた吸収線フィットコード<sup>30)</sup>をもっていました。しかし、これは介在吸収線を対象にしたもの（すなわち掩蔽率を常に 1 と仮定している）であったため、まずはコードの修正から始まり、フィッティング精度の向上に努めること数カ月、ついに C IV, Si IV（シリコンの 3 回電離イオン）、N V（窒素の 4 回電離イオン）<sup>\*13</sup> をもとに検出された 150 個の吸収線系<sup>\*14</sup>に対し部分掩蔽解析（図 3）を行い、39 個もの付随 NAL 系を「一様なデータをもとに」検出することに成功しました<sup>\*15</sup>

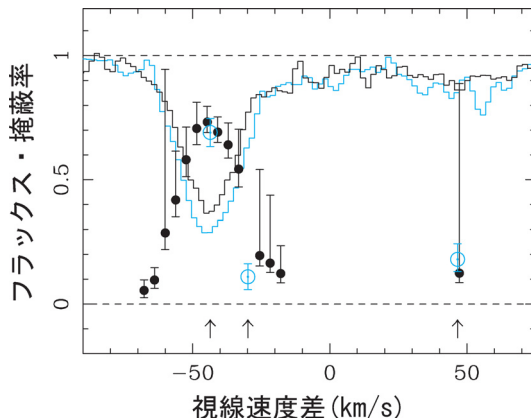


図 3 部分掩蔽解析により、付随吸収線と同定された NAL の 1 例。青線と黒線は、二重吸収線の青側（例えば C IV $\lambda$ 1548）、赤側（例えば C IV $\lambda$ 1551）成分。青丸はモデルフィット後に吸収成分ごとに評価した掩蔽率。黒丸は波長ビンごとに評価した掩蔽率。どちらの結果もよく一致しており、いずれも掩蔽率が 1 よりも小さく評価されています。

私たちが得た付随 NAL の統計的性質は以下のようなものです。

- 約半数の QSO が少なくとも一つの付随 NAL 系<sup>\*16</sup>をもつ。最も単純な解釈として、一般的な QSO の立体角のおよそ半分が付随 NAL 吸収体で覆われていることを示唆。
- 電離状態の異なる二つのサブグループが存在。一部の付随 NAL 系は電離ポテンシャルの高い N V で吸収が強く、他の付随 NAL 系では N V が検出されないか、あるいは検出されても極め

\*10 その後の氏との運命的な対面については早川基金渡航報告書を参照<sup>26)</sup>。  
 \*11 ケック望遠鏡で得られた、赤方偏移が 2 から 4 にある 40 個の QSO の高分散分光スペクトル。もともと宇宙の重水素量を評価するプロジェクトのために取得されたものです。  
 \*12 QSO 吸収線を専門とする Jane Charlton 教授と活動銀河核を専門とする Michael Eracleous 准教授を中心とする合同チーム。このように付随吸収線に重点を置いた研究グループはとても珍しいです。  
 \*13 いずれも部分掩蔽解析に使える二重吸収線。  
 \*14 ある特定の赤方偏移（あるいは QSO からの視線速度差）に位置する吸収線が、複数の遷移状態で検出される場合、すべての吸収線を総称して QSO 吸収線系と呼びます<sup>9)</sup>。  
 \*15 まさにこの記事の執筆中に、結果をまとめた論文の採択を知らせるメールが届きました<sup>9)</sup>。着手してから実に 3 年半。私のアメリカ生活とともに歩んできた、まさに苦楽を共にした論文です。要約だけでもご覧いただけたらうれしい限りです。  
 \*16 注 14 参照。

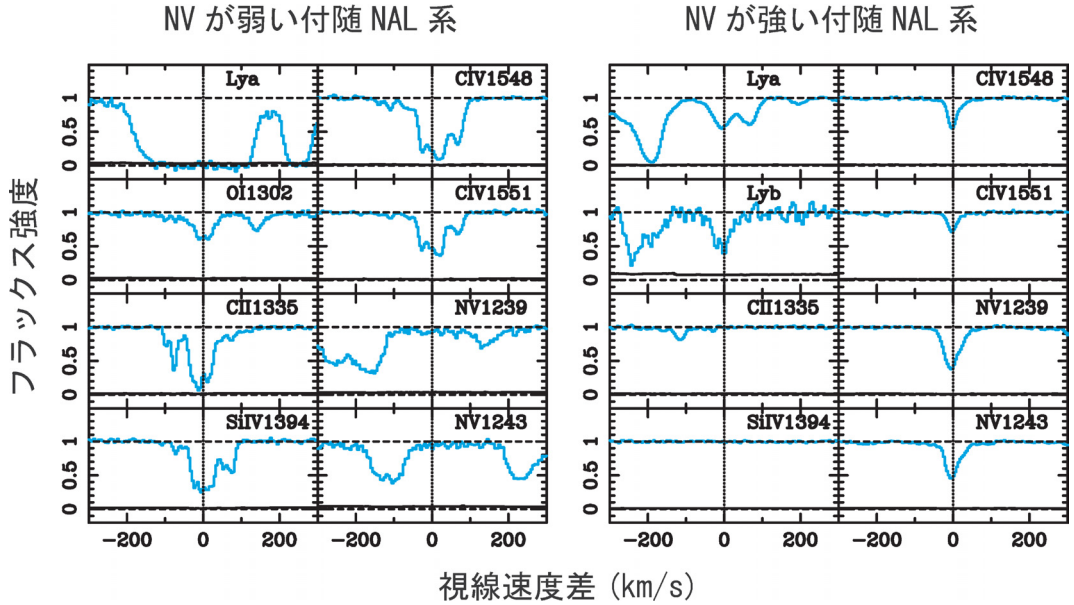


図4 付随NAL吸収線系における電離状態の異なる二つのグループ。左のパネルでは高電離状態にあるNVの吸収線が検出されていないのに対し、右のパネルではNVの吸収線が強く、CIIなどの低電離イオンが検出されていません。

て弱い(図4)。付随NAL吸収体の電離状態は一樣ではない。

- 約25%の付随NAL系に、低電離状態にある原子・イオンによる吸収線(例えば中性炭素原子(CI)、中性酸素原子(OI))を検出。このような低電離原子・イオンの存在はBALでも確認されていたが、その比率はたかだか2%<sup>31)</sup>。両者の電離状態に明らかな差がある。
- 約17%のCIVのNALを付随吸収線と同定。統計的解析に基づくRichardsらの結果(NAL全体の36%が付随吸収線であることを示唆)<sup>17), 18)</sup>と比べると、約半数の付随NAL吸収体が背景QSOを完全に覆っていることになる。同定された付随NALの掩蔽率が0から1まで一様に分布していることも、この考えと矛盾しない。このように、十分なサンプルをもとに初めて明らかになった付随NAL吸収体の性質は、輝線観測や従来のBALによる研究では解明できないものであり、今後のQSO研究においてますます重

要な地位を築いていくと思われます。さらに、従来そのすべてが介在吸収線であると考えられていたNALのうち、看過できない比率で付随吸収線がまぎれていたことは、過去のQSO吸収線を用いた金属量評価の結果などに一定の修正を迫る可能性があり、宇宙論的視点から見ても興味深い結果であることを強調したいと思います。

## 5. 激動する付随吸収線

### —ともに歩んだ mini-BAL—

さて、ここまでは主にBALとNALの比較について述べてきましたが、もう一つのカテゴリー「mini-BAL」についてはほとんど触れてきませんでした。分類の中間でなんだか中途半端。「mini」というのがなんだか弱そう。初めてこの分類を耳にしたとき、私自身それほど強い興味を抱きませんでした。ところがこのmini-BAL、実は付随吸収線を研究するうえでたいへんな威力を発揮します。その理由は、BALと同様その吸収線幅から

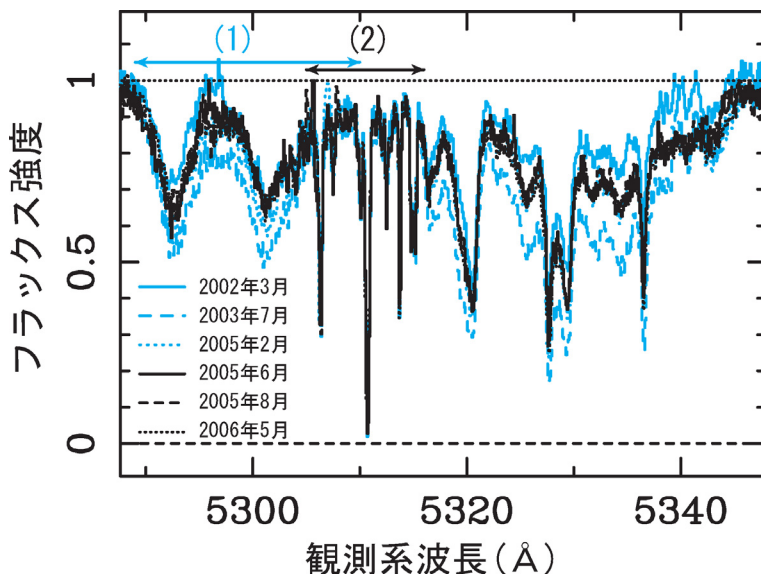


図5 すばる望遠鏡を用いた4年にわたるモニター観測によって明らかになった、HS1603+3820に見られるC IVのmini-BALの時間変動の様子。吸収構造の極小点が、各吸収成分に対応しています。5,320 Åよりも長波長側で吸収構造が複雑になっているのがわかります。モデルフィットは、比較的吸収構造が単純な(1)付近において二つの吸収成分を用いて行いました。なお、(2)付近に見られる幅の細い吸収線群は、たまたまブレンドしてしまったQSOとは無関係な介在吸収線系によるものです。

QSOとの関連が確実視されているにもかかわらず、NALのように各吸収成分を分解することが可能だからです(図1)。この中途半端な性質によって、mini-BALは(付随)吸収線界のサラブレッドにのしあがったのです。

HS1603+3820. 今でもこのQSOの名前を耳にすると、私の(まだそう長くはない)研究生活が走馬灯のように駆け巡ります。このQSOに初めて出会ったのは、私が博士課程の学生するとき。折しもFred Hamannの論文に影響され、付随吸収線に興味をもち始めたときでした。低分散分光観測により、すでにこのQSOにC IVのmini-BALが存在することは知られていました<sup>32)</sup>が、部分掩蔽解析を行うには分解能が不足していました。そこで2002年春、すばる望遠鏡の高分散分光器(HDS)を用いて初めて観測<sup>33)</sup>。この天体との長い付き合いが始まりました。翌年にも観測を行い、部分掩蔽と時間変動の両方を確認。特にその

激しい時間変動(図5)にはたいへん興奮したのを覚えています。もしこの時間変動が電離状態の変化によるものであれば、ガスの電子密度は $10^4 \text{ cm}^{-3}$ 以上、吸収体の光源からの距離は6キロパーセク以下と見積もられます。一方、ガスの固有運動が変動の原因であると考え、吸収体の横断速度が8,000 km/s以上、光源からの距離が0.02 パーセク程度というさらに厳格な条件が加えられます<sup>34)</sup>。さあ、あとは変動の原因がどちらであるかを突き止めるだけ。ところが、楽観的な気持ちで継続したこのQSOに対する4年以上にわたるモニター観測の結果は、私たちのアイデアとは相容れないものでした。

まずガスの固有運動シナリオが除外されました。図5において、すべての吸収成分が同時に変化しているのがわかります。この時間変動がガスの固有運動によるものであれば、すべての吸収体が同時に私たちの視線を横切らなければならず、

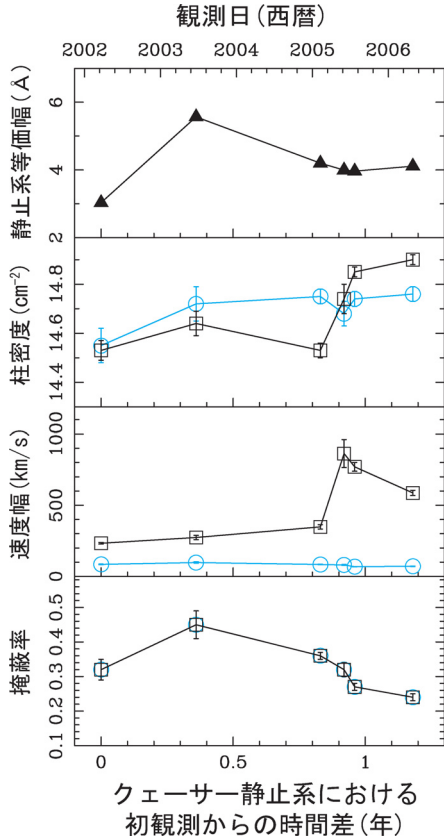


図6 図5の領域(1)に対して、二つの吸収成分をもちいてモデルフィットした際に得られた、各フィットパラメーター(柱密度、速度幅、掩蔽率)の時間変動の様子。同じ mini-BAL に属する吸収線なので、両者の掩蔽率は共通であると仮定しています。等価幅と掩蔽率の間に若干相関があるように見えますが、ほかには目立った関係は見られません。吸収体内部の複雑な構造をほのめかします。

とても適当な案とはいえません。また吸収線の時間変動が最短で16日(QSOの静止系において)で見られました。HS1603+3820のような特に明るいQSOの場合、1年未満の光度変化はほとんど期待できません<sup>35)</sup>。すなわち、QSOからの紫外光の変化によって吸収体の電離状態が変化するというシナリオも現実味に欠けるものとなりました。さらに、各フィットパラメーターの変動に一貫性がなく(図6)吸収体の内部構造が一様で

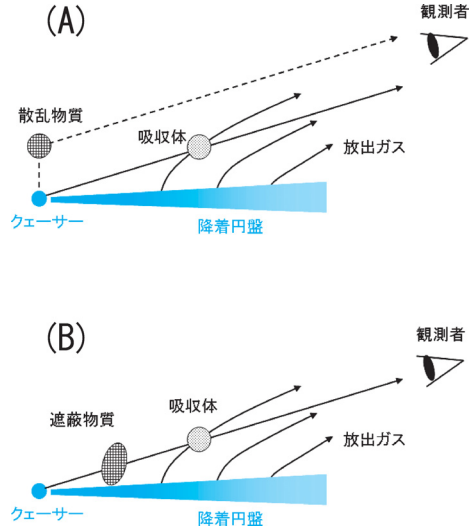


図7 HS1603+3820のmini-BAL吸収体に対する可能なシナリオ。(A)散乱光により、吸収線の掩蔽率が制御されている場合、他のパラメーターと独立な時間変動が可能。偏光分光観測で正当性が確認できます。(B)光源と吸収体の間に遮蔽物質が存在すれば、比較的短い時間スケールで吸収体の電離状態を制御することが可能。遮蔽物の候補としては、高密度・高電離状態にある「暖かいガス」が挙げられ、X線観測によりその存在が確認できるかもしれません。

ないことをほのめかします。付随吸収体の物理状態は私たちが想像していたものより、はるかに複雑だったのです。

それでは一体、この時間変動をもたらしているものは何なのでしょう？ 現在私たちは、以下のような二つのシナリオを提案しています<sup>8)</sup>。

**散乱光による掩蔽率の変動**—一見何の相関もないように見える各フィットパラメーターの時間変動(図6)ですが、よく見ると等価幅と掩蔽率の変化の傾向が似ていることに気づきます。これは吸収線の時間変動が、掩蔽率の変化によるものである可能性を示唆します。もともと別の方向に向かっていてQSOからの光が、何らかの散乱物質によって私たちの方向に進路を変えた場合、吸収体自身が不変でもその掩蔽率に変化を与えること



が可能です (図 7A)。この場合、観測される掩蔽率は、他のパラメーター (柱密度、速度幅など) とは独立に変化することが可能なため、複雑な時間変動を再現できる可能性があります。また、散乱された光は偏光度が高いという性質を活かし、偏光分光観測によって吸収線領域での偏光度が高いことが確認されれば、このシナリオの妥当性を主張することができそうです<sup>36)</sup>。

**遮蔽物質による電離状態の変化**—上述したように、吸収体の電離状態の変化を QSO の光度変化に求めることは不可能ですが、電離状態の変化というアイデア自身はまだ生きています。何が電離状態を変化させるのが問題なのです。QSO の光度が不変でも、吸収体との間に何らかの遮蔽物質が存在し、その光学的厚さが時間変動していれば比較的短いタイムスケールで吸収体に電離状態の変化を与えることができるかもしれません (図 7B)。この遮蔽物質の有力な候補としては、輻射圧によるガスのアウトフローモデル (次章) でその存在が示唆されている、降着円盤近傍に存在する電離した高密度ガス<sup>37), 38)</sup>が挙げられます。また、この遮蔽物質の電離状態は、X 線観測で確認されている「暖かい吸収体<sup>\*17)</sup>」に近いであろうと思われま。今後の X 線観測がこのシナリオの鍵を握っています。

## 6. 付随吸収線の発生機構—モデルとの比較からわかること—

ここまで観測的に明らかになった付随吸収線の性質を述べてきましたが、そもそも付随吸収線はどのようなメカニズムで発生するのでしょうか？

繰り返しになりますが、QSO から放出される莫大なエネルギーは、銀河中心に存在する大質量 BH に近傍のガスなどの物質が降着することによる重力エネルギーの解放でまかなわれています。角運動量をもったガスは回転軸に沿って降着円盤を形成することになりますが、この各運動量がなかなかの曲者で、BH へのガスの供給を継続させるためには何らかの方法で外部に輸送される必要があります<sup>40)</sup>。最も有力視されているシナリオが、降着円盤からのアウトフロー (放出) ガスによるもの<sup>\*18)</sup>。降着円盤からの輻射圧によって上方に打ち上げられたガスが、QSO 中心からの輻射圧によりそのまま外部に加速されるというもので、角運動量の輸送に一役買います<sup>37), 38)</sup>。また、ガスの加速機構として、磁気遠心力的な効果が貢献しているとする案もあります<sup>42), 43)</sup>。これは、高速で回転する降着円盤を突き刺すように延びた磁力線に沿って、遠心力を得たガスが上方に打ち上げられるというものですが、残念ながら角運動量の排出には貢献しません。さらに両者のハイブリッドモデルなんていうものも提唱されています<sup>44)</sup>。いずれの場合も最終的な放出速度としては 1 万 km/s を超えることが可能です。ただし、輻射圧で加速されるガスが、降着円盤にほぼ平行に吹き出されるのに対し、磁気遠心力的な効果で加速されるガスは、降着円盤に対して垂直上方に U の字を描くように吹き出されるというように、構造に幾何学的な違いが生じます<sup>\*19)</sup>。

それでは私たちが QSO のスペクトル上に検出する BAL や付随 NAL と、放出ガスとの関係はどのように考えられているのでしょうか？ ス

<sup>\*17)</sup> 酸素の 6, 7 回電離イオン (O VII, O VIII) 端などによって検出される、温度が 100 万度程度 of ガス。約半数のセイファート銀河で見つかっています<sup>39)</sup>。  
<sup>\*18)</sup> この放出ガス、実は近傍の星間・銀河間物質にも多大な影響を与えます。具体的には、星間物質を過熱することによる星形成活動の抑制、星間・銀河間物質の金属汚染など。このような効果は銀河進化シミュレーションによっても確かめられています<sup>41)</sup>。  
<sup>\*19)</sup> 少々変わり種のシナリオとしては、AGN の統一モデルにも採用されているダストトラスからのガスの放出というものもあります<sup>45)</sup>。QSO 中心からのフラックスにより蒸発されたトラス表面のガスが、圧力差を利用して加速されるというものですが、この場合、放出速度はたかだか数千 km/s にしか達しません。

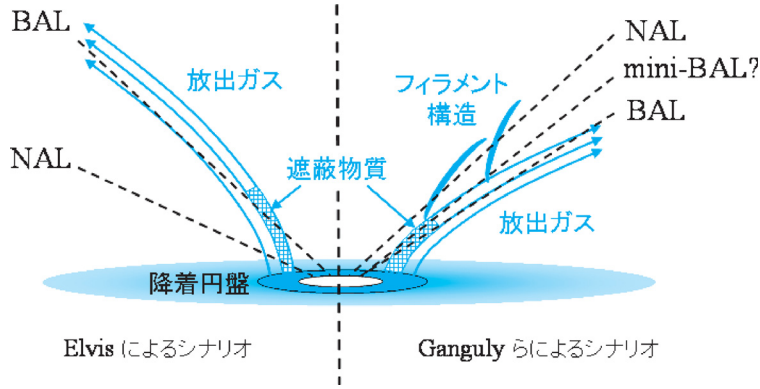


図8 付随 NAL の発生機構に対して提唱されている二つのシナリオ。Elvis<sup>47)</sup> が、BAL よりも浅い角度で降着円盤を見ると NAL が見られると考えているのに対し、Ganguly ら<sup>46)</sup>は、BAL よりも深く見ると NAL が検出されると提案。私たちの観測結果は後者を支持するものとなっています。

ムズで幅の広い吸収構造をもつ BAL がこの放出ガスそのものによって作られていることは、観測的にもサポートする結果が得られており<sup>46)</sup>、広く受け入れられているところです。それに対し、付随 NAL の発生機構については二つのシナリオが提唱されています(図8)。一つめは、付随 NAL は BAL よりも深い角度で降着円盤を見込むときに検出されるというもの<sup>46)</sup>。この場合、付随 NAL の幅の狭い吸収構造を再現するためには、放出ガスの上方に塊状の吸収体が存在する必要があります。輻射圧による放出ガスモデル<sup>37)</sup>をシミュレーションで再現したときに表れるフィラメント構造<sup>38)</sup>は、周りに存在するガスよりも高密度・低電離状態にあり、付随 NAL をもたらす吸収体の候補として注目されます。これに対して、BAL よりも浅い角度で降着円盤を見込むときに付随 NAL が検出されるとする考えもあります<sup>47)</sup>。この場合、放出ガスの根元にある、まだ十分に加速されていないガスが付随 NAL をもたらすと考えます。観測的に区別できる両者の決定的な違いは、付随 NAL が取りうる最大放出速度。前者が BAL と同様に数万 km/s まで加速されうるのに対し、後者ではたかだか数千 km/s です。私たちが検出した付随 NAL は、その放出速度が 6 万 km/s 程

度まで広がっていますので前者をサポートする結果となります。また後者の場合、私たちの視線は (BAL の場合と同様に) QSO 中心付近に存在すると考えられている、高密度・高電離遮蔽ガスを通ることになります。BAL が検出された QSO の高電離ガスの柱密度が X 線観測により  $10^{23} \text{ cm}^{-2}$  程度であると評価されている<sup>48), 49)</sup>のに対し、私たちの予備調査では QSO が付随 NAL のみをもつ場合、柱密度が  $10^{22} \text{ cm}^{-2}$  程度以下であることを確認しています<sup>50)</sup>。これも、二つめのシナリオにとって都合の悪い観測結果です。ちなみに、一つめのアイデアを受け入れた場合、mini-BAL は両者の中間、すなわち放出ガスの近くに存在するフィラメント構造によってもたらされているのではないかと考えています。

このように私たちのグループでは、今まであまり注目されてこなかった付随 NAL について大々的に同定作業を行い、その内部構造、電離状態、分布状況をもとに、BAL との間に明らかな違いがあることを突き止めました(4章)。また、BAL と付随 NAL の観測結果を再現するうえで、最もふさわしい放出ガスの構造の絞込みを試みました(6章)。さらに、mini-BAL については、4年以上にわたる高分散分光モニター観測により、その複

雑な時間変動メカニズムの存在を明らかにしました (5章). 遠方にある QSO を対象としたこのような詳細なモニター観測は, ほかに例がないことを述べておきます.

さて本稿をご覧になり, みなさんの QSO 吸収線に対するイメージに変化はあったでしょうか? 当然のことながら, QSO 吸収線による研究は QSO に対する視線上に存在する物質しか調べられません. しかし, 私たちはこれを欠点ではなく長所であると考えています. 輝線観測の場合, その光源として QSO の連続光領域, 広輝線領域, 狭輝線領域などを同時に考慮に入れる必要があります, さらに近傍の星々からの光による汚染も課題の一つです. それに対し, 吸収線観測は, 視線方向上に存在する物質の情報だけを (他者の影響を受けずに) 効率よく取得することができます. また視線速度の異なる吸収体は, ドップラー効果によってスペクトル上での位置がずれるので, 奥行きのあるガス構造を探ることが可能です. 輝線と吸収線はまさに二人三脚. 今後さらなる進展が期待されるこの分野の研究において, 吸収線的手法を用いて貢献していくことが私の将来の目標です.

## 7. 新しい出会いを求めて

ペンシルベニア州立大学に研究員として赴任して一月ほどたったある日, 私のボスである Jane がこんなことを話してくれました. 「新しいポストドクを選考しているときに, 偶然 Toru (私) の HS1603+3820 の論文を見つけた. それは最終選考の前日だった.」その効果もあってか, 現在ここに籍をおいて研究をしているわけですが, もし HS1603+3820 と出会っていなければ, あるいはこの QSO が付随吸収線の兆候を示していなければ, 私の研究人生も全く違ったものになっていたかもしれません. 宇宙にとってはほんの些細な出来事が, 私の人生には大きな影響を与えました. これからどんな天体に出会い, そして私の人生にどんな影響を与えていくのでしょうか. また本稿

を読み, 少しでも QSO 吸収線に興味をもたれた方との共同研究, なんていううれしい出来事も少なからず期待してしまいます. 人についても, 天体についても, これから始まるたくさんの出会いを楽しみにしながら, 今日吸収線に隠されたメッセージに耳を傾けています.

## 謝 辞

本稿で紹介した内容は, 主にペンシルベニア州立大学での研究をもとにしたものであり, 共同研究者である Jane Charlton, Michael Eracleous, Rajib Ganguly の各氏の協力なくして成し遂げられるものではありませんでした. また, すばる望遠鏡での観測に協力してくださった山田 亨さん, 柏川伸成さん, HS1603+3820 を最初に私に紹介してくださった田中 壱さん, ケック望遠鏡のデータを提供してくださった David Tytler さん, 本稿の執筆を勧めてくださった今西昌俊さんにお礼申し上げます. 最後に, 本稿を最後まで読んでくださった読者のみなさんにお礼申し上げます. なお, 本稿は海外で執筆されたため手元に資料がなく, 2003 年以前の天文月報の記事を十分に引用できなかったことをお詫びいたします.

## 参 考 文 献

- 1) 谷口義明, 2001, 天文学への招待, 岡村定矩編 (朝倉書店), pp. 115-124
- 2) 寺島雄一, 2005, 天文月報, 98, 453
- 3) 川口俊宏, 2004, 天文月報, 97, 694
- 4) 長尾 透, 2004, 天文月報, 97, 563
- 5) 長峯健太郎, 2006, 天文月報, 99, 311
- 6) 三澤 透, 家 正則, 2000, 天文月報, 93, 712
- 7) Reichard T. A., et al., 2003, AJ 125, 1711
- 8) Misawa T., et al., 2007, ApJ 660, 152
- 9) Misawa T., et al., 2007, ApJS, in press (astro-ph/0702101)
- 10) Hamann F., Sabra B., 2004, ASPC 311, 203
- 11) Foltz C. B., et al., 1986, ApJ 307, 504
- 12) Weymann R. J., et al., 1979, ApJ 234, 33
- 13) Carswell R. F., et al., 1982, MNRAS 198, 91
- 14) Tytler D., 1987, ApJ 321, 49

15) Yee H. K. C., Green R. F., 1987, ApJ 319, 28  
 16) Wold M., et al., 2000, MNRAS 316, 267  
 17) Richards G. T., et al., 1999, ApJ 513, 576  
 18) Richards G. T., 2001, ApJS 133, 53  
 19) Peterson B. M., 1997, An Introduction to Active Galactic Nuclei (Cambridge University Press), Chap. 12  
 20) Stocke J. T., et al., 1992, ApJ 396, 487  
 21) Hamann F., et al., 1997, ApJ 478, 80  
 22) Barlow T. A., Sargent W. L. W., 1997, AJ 113, 136  
 23) Charlton J. C., et al., 2003, ApJ 589, 111  
 24) Ding J., et al., 2003, ApJ 587, 551  
 25) Hamann F., Barlow T. A., Junkkarinen V., 1997, ApJ 478, 87  
 26) 三澤 透, 2007, 天文月報, 100, 103  
 27) Ganguly R., et al., 1999, AJ 117, 2594  
 28) Crenshaw D. M., Maran S. P., Mushotzky R. F., 1998, ApJ 496, 797  
 29) Misawa T., et al., 2004, AJ 128 2954  
 30) Churchill C. W., Vogt S. S., 2001, AJ 122, 679  
 31) Reichard T. A., et al., 2003, AJ 126, 2594  
 32) Dobrzycki A., Engels D., Hagen H.-J., 1999, A&A 349, L29  
 33) Misawa T., et al., 2003, AJ 125, 1336  
 34) Misawa T., et al., 2005, ApJ 629, 115  
 35) Hawkins M. R. S., 2001, ApJ 553, L97  
 36) Lamy H., Hutsemekers D., 2004, A&A 427, 107  
 37) Murray N., et al., 1995, ApJ 451, 498  
 38) Proga D., Stone, J. M., Kallman, T. R., 2000, ApJ 543, 686  
 39) Crenshaw D. M., et al., 1999, ApJ 516, 750  
 40) 川勝 望, 2006, 天文月報, 99, 75  
 41) Springel V., Di Matteo T., Hernquist L., 2005, ApJ 620, L79  
 42) Blandford R. D., Payne D. G., 1982, MNRAS 199, 883  
 43) Konigl A., Kartje J. F., 1994, ApJ 434, 446  
 44) Everett J. E., 2005, ApJ 631, 689  
 45) Chelouche D., Netzer H., 2005, ApJ 625, 95  
 46) Ganguly R., et al., 2001, ApJ 549, 133  
 47) Elvis M., 2000, ApJ 545, 63  
 48) Green P. J., Mathur S., 1996, ApJ 462, 637  
 49) Gallagher S. C., et al., 2002, ApJ 567, 37  
 50) Misawa T., et al., 2007, in preparation

**Active Galactic Nuclei Probed by QSO Absorption Lines**

**Toru MISAWA**

*Department of Astronomy & Astrophysics, The Pennsylvania State University, 525 Davey Lab, University Park, PA 16802, USA*

Abstract: Quasars (Quasi-Stellar Objects) are the extremely bright nuclei found in about 10% of galaxies. A variety of absorption features (known collectively as quasar absorption lines) are detected in the rest-frame UV spectra of these objects. While absorption lines that have very broad widths originate in gas that is probably physically related to the quasars, narrow absorption lines (NALs) were thought to arise in galaxies and/or the inter-galactic medium between the quasars and us. Using high-resolution spectra of quasars, we have found that a substantial fraction of NALs arise in gas in the immediate vicinity of the quasars. We also found a dramatically variable, moderately-broad absorption line in the spectrum of the quasar HS 1603+3820. We have monitored the variability of this line in a campaign with Subaru telescope. We compared these observational results to models for outflows from the quasars, specifically, models for accretion disk winds and evaporating obscuring tori. It is quite important to determine the mechanism of outflow because of its cosmological implications. The outflow could expel angular momentum from the accretion disk and enable quasars to accrete and shine. In addition, the outflow may also regulate star formation in the early stages of the assembly of the host galaxy and enrich the interstellar and intergalactic medium with metals.