

活動銀河核の化学進化

長尾 透

〈国立天文台光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: tohru@optik.mtk.nao.ac.jp



宇宙の歴史の中で重元素量がどのような進化を遂げてきたのかを探るため、筆者らは特に活動銀河核の電離領域における重元素量に着目し、その進化を観測的に明らかにする取り組みを続けてきています。本稿では、なぜ活動銀河核に着目することがよい戦略なのかについて述べた後で、二つの違った手法によって活動銀河核の電離領域における重元素量進化について探った筆者らの最近の研究成果について紹介します。いずれの手法を用いても、活動銀河核の重元素量は光度が明るい天体ほど多いという結果が得られますが、この光度-重元素量関係が赤方偏移 2 から 4 程度まで無進化だという結論について報告します。

はじめに：宇宙の化学進化

今からおよそ 137 億年前、ビッグバンを終えた誕生直後の宇宙には、ビッグバンで合成可能な水素とヘリウム、そしてごく微量のリチウムなどの軽元素しか存在していませんでした。地球のような岩石質の惑星やわれわれ人類をはじめとする生命の存在に欠かせない炭素や酸素や鉄といったさまざまな重元素は、宇宙 137 億年の歴史の中で無数の恒星における核融合反応や超新星爆発により徐々に合成・蓄積されてきたと考えられています。しかし、こうした重元素の存在量が宇宙のどの時点でどの程度の量に達していたのか、すなわち宇宙の化学進化の歴史については、いまだ定量的には理解が進んでいないのが実情です。われわれ自身の起源を知るためにも、宇宙の化学進化史を解き明かすことは極めて意義の大きな課題であると言えるでしょう。

宇宙の化学進化について観測的に調べるうえで有効だと思われる一つの方法は、銀河の重元素量が赤方偏移の関数として（すなわち宇宙年齢の関数として）どのような変遷を遂げてきたのかを高

赤方偏移から低赤方偏移まで（初期宇宙から現在の宇宙まで）統計的に調べることです。近傍宇宙における星形成銀河のガス成分の重元素量は、静止系可視スペクトルに見られるさまざまな輝線の強度比を調べることで比較的容易に測定することが可能ですが¹⁾、赤方偏移が 1 程度（宇宙年齢が現在の半分程度）を超えると事情は様変わりしてしまいます。なぜなら、赤方偏移の効果によって静止系可視スペクトルを観測するために赤外線分光観測が必要となり、また銀河の明るさもとても暗くなってしまうため、重元素量測定に必要な精度でスペクトルを取得することがたいへん困難になるからです。

この困難を克服して銀河の重元素量を高赤方偏移まで調べるためには、どうすればよいのでしょうか？ 一つの方法は、莫大な望遠鏡時間を投入して、赤外線分光観測によって星形成銀河の静止系可視スペクトルを取得していくことでしょうか²⁾。しかし筆者らは少し視点を変え、銀河中心部の超巨大ブラックホールへの質量降着によって明るく輝く天体である『活動銀河核』に注目することにしました。活動銀河核も星形成銀河と同様

に電離ガスからのさまざまな輝線がスペクトル中に見られるため、その強度比から重元素量の測定を行うことができます。活動銀河核を使って重元素量の研究を進めることには、次の二つの重要なメリットがあります。(1) 活動銀河核は星形成銀河に比べて非常に明るく、そのため遠方の天体でも比較的容易に分光観測ができる。(2) 降着円盤からの放射には高エネルギー光子が多量に含まれているために静止系紫外スペクトルにさまざまな高電離輝線が見られ、そのため赤方偏移が大きくても赤外線ではなく可視の分光観測で重元素量の測定を進められる。このようなメリットを踏まえ、筆者らはここ数年間、系統的に活動銀河核の重元素量測定についての研究を進めてきました。本稿ではその成果についての報告をさせていただきます。

1. SDSS クェーサーの化学進化

高赤方偏移における活動銀河核の重元素量の観測的研究は、特にクェーサーと呼ばれる高光度活動銀河核に対して、これまでも盛んに行われてきています。具体的には、静止系紫外スペクトル中に見られる速度幅の広い(秒速数千 km 程度)輝線の強度比を光電離モデル計算による理論予測と比較することで、電離ガスの重元素量が調べられます。これまでの研究では、赤方偏移の大きなクェーサーほど重元素量が多いこと、また光度の高いクェーサーほど重元素量が多いことが指摘されてきました³⁾。しかし、遠方にある天体ほど光度の高いものしか観測対象になりにくいという選択効果を考慮すると、この二つの傾向は独立なものではないと考えられます。いったい、赤方偏移と光度のどちらがクェーサーの重元素量を決定づけているのでしょうか？

ここで威力を発揮するのが、日本も参加している国際プロジェクトであるスローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) のデータベースです。このプロジェクトでは、ニューメキシコ州のアパッチポ

イント天文台にある口径 2.5 m の専用望遠鏡を使って全天のおよそ 4 分の 1 にわたる広大な天域の多色撮像データを取得し、また観測領域内にあるおよそ 100 万天体の可視スペクトルを取得します。クェーサーのスペクトルも最終的には 10 万天体について取得される予定です。これだけ多数のクェーサーのスペクトルがあれば、同じ光度で赤方偏移だけが違うクェーサーのスペクトルを比較したり、同じ赤方偏移で光度の違うクェーサーのスペクトルを比較したりすることなど容易に行えます。素晴らしいことに、SDSS で得られたデータは使いやすいフォーマットでインターネットにて順次公開され、誰でも取得することができます。そこで筆者らはこの SDSS のデータベースから、静止系紫外域に見られる Ly α ・N V・C IV・He II といった重要な輝線を SDSS の分光観測でとらえることができる $2.0 < z < 4.5$ の赤方偏移範囲にあるクェーサー (およそ 6,000 天体) のスペクトルを取得し、その性質を調べることにしました⁴⁾。

SDSS の分光観測の本来の目的は銀河などの赤方偏移の確認ですので、SDSS クェーサーの個々のスペクトルは必ずしもさまざまな輝線強度を調べるのに十分な質で取得されているわけではありません。そこで、同程度の光度・赤方偏移をもつ多数のクェーサーのスペクトルを合成し、それぞれの光度・赤方偏移ごとに典型的なスペクトルを作成して輝線強度比などの解析を進めることにしました。いわゆる **stacking analysis** と呼ばれる手法です(図 1)。こうして作成した合成スペクトルから、重元素量と強く相関することが知られている輝線強度比が赤方偏移・天体光度(静止系 B バンドでの絶対等級)とどのような関係になっているかを調べてみた結果が図 2 です。結果は一目瞭然で、同じ天体光度のクェーサーは赤方偏移が変わってもほとんど同じ輝線強度比を示すこと、そして赤方偏移が同程度のクェーサーであればその輝線強度比は天体光度に強く相関することが見て

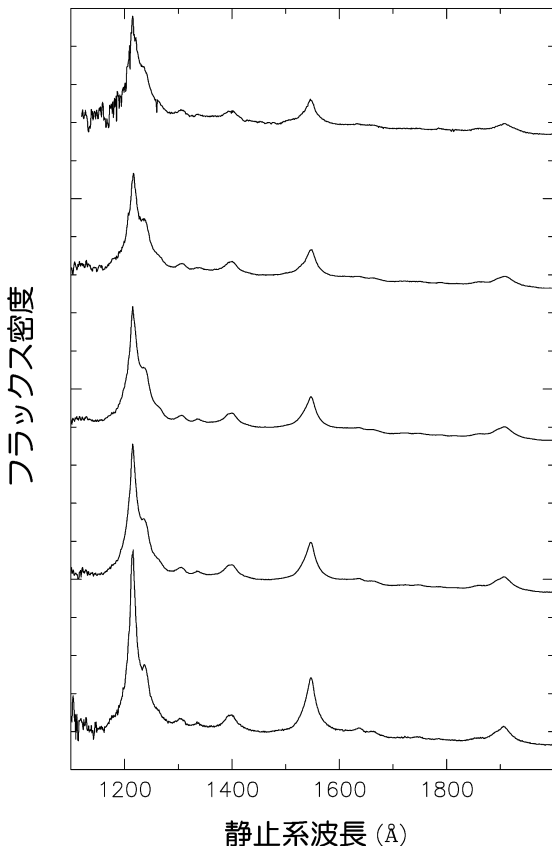


図1 Stacking analysis により作成された、SDSS クェーサーの静止系紫外線スペクトルの例。示されたスペクトルはすべて $2.0 < z < 2.5$ についての合成スペクトル。下側のもほど低光度、上側のもほど高光度のクェーサーを合成したものである（下側からそれぞれ、 $-24.5 > M_B > -25.5$, $-25.5 > M_B > -26.5$, $-26.5 > M_B > -27.5$, $-27.5 > M_B > -28.5$, $-28.5 > M_B > -29.5$ ）。合成に使った天体数は、低光度側からそれぞれ 643 天体, 1,497 天体, 917 天体, 105 天体, 5 天体。

取れます。

観測量であるこれらの輝線強度比から重元素量を導出するには、輝線強度比と光電離モデル計算の結果を比較することが必要です。ここで、stacking analysis により作成した合成スペクトルは非常にノイズが小さくなるため、弱い輝線も含め多数の輝線強度比を重元素量推定に使える点がポイントです。というのは、過去のクェーサー重元素

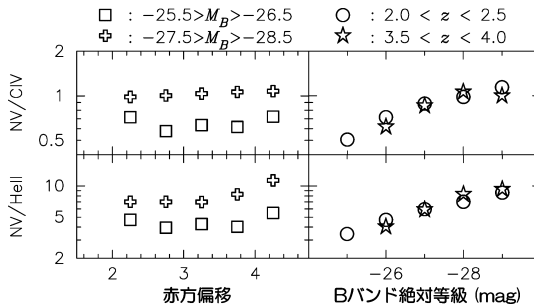


図2 SDSS クェーサーの合成スペクトルから測定された輝線強度比、N V1240/C IV1549（上図）と N V1240/He II1640（下図）を、光度を一定にして赤方偏移の関数として示したものの（左図）と、赤方偏移が一定の場合に光度の関数として示したものの（右図）。左図中の四角印と十字印が低光度クェーサー ($-25.5 > M_B > -26.5$) と高光度クェーサー ($-27.5 > M_B > -28.5$) を示し、右図中の丸印と星印が低赤方偏移クェーサー ($2.0 < z < 2.5$) と高赤方偏移クェーサー ($3.5 < z < 4.0$) を示す。これら二つの輝線強度比は重元素量のよい指標としてよく知られたものであり、それらが赤方偏移によらず光度だけで決まっている様子がわかる。

量の研究では主に N V・C IV・He II の三つの輝線だけが使われていて、重元素量に対する窒素存在比の敏感な振舞いが結果をほとんど決めてしまっていたからです。比較的弱い輝線である Al III なども含め多数の輝線を重元素量推定に使用したという点は、先行研究に比べた際の一つの本研究の特徴です。こうして推定した重元素量を赤方偏移と天体光度の関数として表示したのが図3ですが、当然ながら図2で示した輝線強度比の振舞いと同様に、「天体光度と重元素量との間に密接な関係があり、その関係は赤方偏移 4.5 まで進化しない」という結果が得られました。この結果を信じると、重元素量増加の原因となる母銀河中での星形成活動は赤方偏移 4.5 よりもさらに高赤方偏移で生じていたはずですから、クェーサー母銀河のような大質量銀河の形成は非常に初期の宇宙で起きていたはずだというセンセーショナルなことが示唆されます。

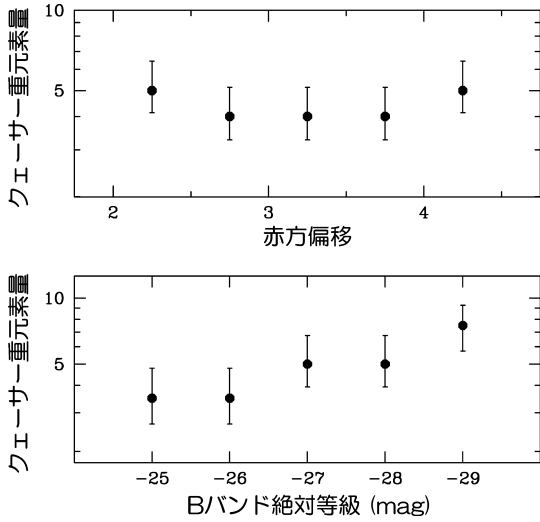


図3 合成スペクトルから測定された輝線強度比と光電離モデルの計算結果との比較により導出された、SDSS クェーサーの典型的な重元素量。縦軸は太陽重元素量で規格化してある。上図では赤方偏移の関数として、下図ではクェーサー光度の関数として示している。

2. 電波銀河の化学進化

ところで、前節で紹介した SDSS クェーサーの重元素量の研究は「速度幅の広い」輝線の強度比を用いて行われたものです。この速度幅の広い輝線は、銀河中心にある超巨大ブラックホールの周囲 0.1 光年またはそれよりさらに内側で高速運動する電離ガスから放射されたものなのですが、このように銀河スケール（1 万光年程度）より何桁も小さい空間スケールの現象が母銀河全体の星形成史を本当に反映しているのかという点が少し気がかりです。もし「速度幅の狭い」輝線（秒速数百 km 程度）を用いた解析ができれば、中心核から 100 光年から 1 万光年程度のスケールに存在する電離ガスの重元素量を測定できるため、母銀河と同程度の空間スケールの現象による議論を展開することが可能になります。しかしクェーサーの静止系紫外スペクトルではこの速度幅の狭い輝線は速度幅の広い輝線に埋もれてしまい、輝線強度

比の測定ができません。速度幅の狭い輝線の解析に基づく重元素量を測定するために、何とかしてこの速度幅の広い輝線をスペクトルから取り除くことはできないでしょうか？

一つのアイディアは、「2 型」と呼ばれる種類の活動銀河核に注目することです。実は超巨大ブラックホールの周囲には内径が 0.01 光年から 1 光年程度のドーナツ型ダストトラスが存在しているので、このトラスを真横から見れば速度幅の広い輝線を放射する領域は隠され、速度幅の狭い輝線だけが観測されることとなります。このようにトラスを横から見ている活動銀河核が 2 型と呼ばれ、前節のクェーサーのような 1 型（中心核がトラスに隠されていない）のものと区別して分類されています。この 2 型活動銀河核は中心核がトラスに隠されているために 1 型活動銀河核よりも暗く、それゆえ見つけることが困難であるために高赤方偏移の宇宙ではあまり多く発見されていません。その中でも電波銀河と呼ばれる 2 型の活動銀河核は高赤方偏移の宇宙においても 100 天体程度が発見されているため、筆者らはこの種の活動銀河核に注目してその輝線強度比から重元素量を推定することを考えました⁵⁾。

なお、電波銀河の静止系紫外線スペクトルを用いた重元素量導出は過去にも試みられており、赤方偏移が 3 を超すと重元素量が低赤方偏移の電波銀河に比べて少なくなるという報告もなされています⁶⁾。ただしここで注意しなければいけないのは、過去の電波銀河の重元素量についての研究は N V の輝線強度に基づいているという点です。2 型活動銀河核の N V は一般にとっても微弱で、先行研究でも半分以上の高赤方偏移電波銀河では N V は検出されていません。このように微弱で強度測定が困難な輝線を使うのではなく、高精度での測定が容易な強い輝線だけを使って重元素量を診断するほうが望ましいことは言うまでもありません。電波銀河の静止系紫外スペクトル中に強く見られる輝線といえば C IV・He II・C III] の三つ

が挙げられますが、この三つの輝線だけを使って重元素量を診断することはできないでしょうか？

ここで注目すべき点は、先に挙げた三つの輝線のうち **He II** は2階電離ヘリウムから1階電離ヘリウムへの再結合に伴う輝線である一方で、**C IV** は3階電離炭素の衝突励起に伴う輝線であるというように、輝線の放射メカニズムが違っていているということです。光電離平衡にあるガスであれば再結合線強度は光電離の回数に比例しますから、**He II** の強度はヘリウムを2階電離させるために必要な **54.4 eV** 以上の光子が降着円盤からの放射にどれだけ含まれているかだけでおおよそ決まります。ところが **C IV** の強度は衝突励起の頻度で決まるため、電離ガスの平衡温度に強く依存します。そのため、輝線強度比 **C IV/He II** はガス温度が低い場合、すなわち重元素量が多い場合に小さくなることになります。ただし **C IV/He II** の比は重元素量だけでなく、例えばガスの電離度にも依存します。この効果の補正に有効なのが輝線強度比 **C III] / C IV** (2階電離炭素と3階電離炭素の存在比を反映) です。以上から、**C IV/He II** と **C III] / C IV** の両輝線強度比を組み合わせることで、電波銀河の重元素量を診断できることが期待されます。図4にこの両輝線強度比の光電離モデルによる計算結果を示しますが、確かにこの方法で重元素量を診断できることが見て取れます。なお少し余談になりますが、ここで使用している三つの輝線はどれも比較的電離度が高く、電離ガス中のダスト微粒子は壊されていると仮定してもよい⁷⁾ため、光電離モデル計算中のダストに関するパラメーターで悩まなくてもよいというのは計算上の嬉しいメリットです。過去の文献から集めた49天体の電波銀河 ($1.2 < z < 3.8$) の輝線強度比のデータを図4に示しましたが、光電離モデルの計算結果のグリッドと似た分布をしていて、光電離モデル計算の妥当性を示唆しています。

さて、では以上の準備を踏まえて、電波銀河の

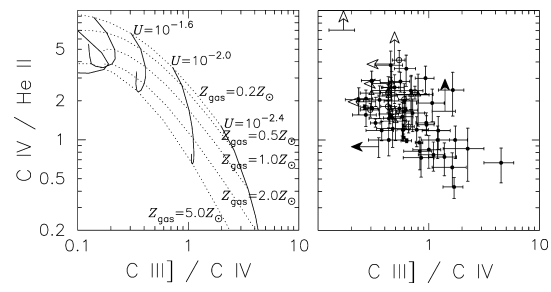


図4 高赤方偏移の電波銀河に対する新しい重元素量診断図。縦軸が重元素量に敏感な輝線強度比である **C IV1549/He II1640**、横軸が電離度の補正に有用な輝線強度比である **C III] 1909/C IV1549**。左図では筆者らにより光電離モデルの計算結果を、右図ではこれまでの観測で得られている電波銀河の輝線強度比の測定値を、それぞれ示している。左図中の実線は電離パラメーター一定で重元素量を変えた場合のモデルの振舞い、点線は重元素量一定で電離パラメーターを変えた場合のモデルの振舞いを示す。右図中で矢印により示されたデータは上限値もしくは下限値。白抜きで示されているデータは電波で暗い活動銀河核についての輝線強度比である。

電離ガス領域の重元素量の赤方偏移と天体光度への依存性を見てみることにしましょう。先に述べた49天体の電波銀河の輝線強度比の値を、赤方偏移ごとに、そして天体光度ごとに平均し、その傾向を図5に示しました。なお2型活動銀河核は中心核からの放射がダストオーラに隠されているため、キューサーのように**B**バンド絶対等級を天体光度の指標として使うことができません。そのためここでは **54.4 eV** より高エネルギーの電離光子光度におおよそ比例する **He II** 輝線の光度を天体光度の指標として使っています。図5中の左図では赤方偏移ごとに電波銀河の輝線強度比がどう変化するかを示したのですが、顕著な傾向は見られません。ところが右図の天体光度ごとに電波銀河の輝線強度比がどうなっているかを調べたものを見ると、明るい電波銀河ほど重元素量が多くなっているという傾向が見られます。これらの結果が前節で見た **SDSS** キューサー

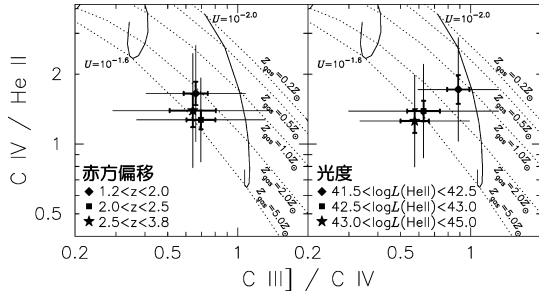


図5 図4と同じ重元素量診断図を用いて、電波銀河の重元素量の赤方偏移依存性(左図)と光度依存性(右図)を調べたもの。左図では観測データを低赤方偏移天体(菱形印)・中赤方偏移天体(四角印)・高赤方偏移天体(星印)の三つに分け、それぞれの輝線強度比の平均値を示している。2種類の誤差棒のうち細いものはデータの分散を、太いものは平均値の推定誤差に対応している。右図では観測データを低光度天体(菱形印)・中光度天体(四角印)・高光度天体(星印)の三つに分けて示した。左図では赤方偏移が違っていても傾向が見られないが、右図では高光度のものほど系統的に図中で左下側にくることから、重元素量が光度と正の相関をもつことがわかる。

の傾向と完全に合致していることは非常に重要な結論です。すなわち、中心核最近傍部に分布する高速運動ガスについても、母銀河と同程度の空間スケールに分布するガスについても、活動銀河核の電離ガスの重元素量は天体光度と強い正の相関があり、その関係は赤方偏移4程度まで全く無進化だということがわかりました。

3. 議論と今後の展望

前節までで、活動銀河核には顕著な光度-重元素量関係が見られそれが赤方偏移4程度まで無進化だという結果を報告しました。この光度-重元素量関係の起源ですが、(1) 活動銀河核の光度は超巨大ブラックホールへの質量降着がエディントン降着率で決まっていると仮定すればブラックホールの質量に比例すること、(2) 超巨大ブラックホール質量と母銀河の星質量には顕著な正の相

関があること、(3) 活動銀河核の電離ガス領域の重元素量は母銀河の重元素量を反映するであろうこと、の三つを踏まえれば、昔からよく知られている銀河質量-重元素量関係を見ていると解釈することができそうです。ところが、この銀河質量-重元素量関係は赤方偏移が0から2まで程度の間で顕著な進化を示すことが最近の観測により明らかになっています²⁾。赤方偏移が4程度まで無進化だという活動銀河核の光度-重元素量関係とはずいぶん進化の様子が違っているように思えますが、これは何を物語っているのでしょうか？

一つの解釈は、銀河の化学進化の進み方の銀河質量への依存性が効いているという考え方です⁸⁾。銀河の質量-重元素量関係は赤方偏移0から2にかけて顕著な進化を示していますが、とりわけ質量の軽い銀河が激しく進化している一方で大質量銀河はあまり大きな進化を示していません²⁾。これは、大質量銀河の化学進化が赤方偏移2程度ですすでにおおむね完了してしまっている一方で小質量銀河の化学進化がそれよりも遅れて進行すると考えれば理解することができます(銀河のダウンサイジング)。われわれの活動銀河核についての研究で対象となっている銀河(キューサー母銀河)は各赤方偏移において最も大質量の銀河に対応すると考えられますから、活動銀河核として明るく輝いている時点ですすでにもう母銀河における化学進化はおおむね完了してしまっているのかもしれない。もしこの解釈が正しいとするならば、もっと低光度の活動銀河核に着目すれば重元素量の赤方偏移進化が見えてくることが予想されます。残念ながら現在の段階では高赤方偏移における低光度活動銀河核はほとんど見つかっておらず、この解釈を検証することができませんが、すばる望遠鏡の次世代観測装置として検討が進められているHyper Suprime-Camを使った広視野での活動銀河核探査が実現すれば高赤方偏移の低光度活動銀河核が発見され、ここで議論している銀河の化学進化についても重要な観測的研究

を展開することができるでしょう。

別の解釈として、超巨大ブラックホールへの質量降着率が重要な役割を果たしているという考え方があります。というのは、質量降着率の高い活動銀河核が選択的に高い重元素量を示すという示唆が過去に得られているからです⁹⁾。確かに、前述の議論では活動銀河核の質量降着がエディントン降着率で決まっていると仮定していましたが、実際には必ずしもこの仮定が正しくないことは近傍宇宙における多様な活動銀河核を見れば明らかです。活動銀河核の光度がエディントン降着率にあまりよらないような降着率で決まっているとすれば、活動銀河核の光度と母銀河の質量には強い結びつきがないことになり、銀河と活動銀河核が異なる化学進化を示すことに対して不都合がなくなります。実際に活動銀河核の重元素量を特徴づけているのでは天体光度ではなく質量降着率だという提案もなされています¹⁰⁾、しかしどうして質量降着率と重元素量が結びつくのかという点については明確な描像が得られていません。超巨大ブラックホールへの質量降着も考慮に入れたような銀河化学進化の詳細なシミュレーションが待たれるところです。

このように、いまだ確固とした解釈は得られていませんが、少なくとも活動銀河核が顕著な天体光度-重元素量関係を示し、この関係が赤方偏移4程度まで無進化だということは観測的に明らかになりました。この結果の適切な解釈を考えるうえでも、活動銀河核の重元素量の観測的研究をより高赤方偏移・低光度に拡張していくことが今後の課題になると思われます。特に低光度活動銀河核を調べるためには観測対象の探査から行う必要がありますが、さまざまな方々と力を合わせながら今後もこの分野の研究へのチャレンジを続けていきたいと考えています。

謝 辞

本稿は、イタリア共和国フィレンツェにあるアルチェトリ天文台に筆者が滞在していた際の研究成果をまとめたものです。およそ2年半に及んだ筆者の在外研究の主要な共同研究者である Roberto Maiolino (現所属:ローマ天文台)と Alessandro Marconi (現所属:フィレンツェ大学)に感謝いたします。なおこの在外研究は、日本学術振興会からの援助によって行われたものです。

参 考 文 献

- 1) Nagao T., Maiolino R., Marconi A., 2006, A&A 459, 85
- 2) Erb D., et al., 2006, ApJ 644, 813
- 3) Hamann F., Ferland G., 1999, ARA&A 37, 487
- 4) Nagao T., Marconi A., Maiolino R., 2006, A&A 447, 157
- 5) Nagao T., Maiolino R., Marconi A., 2006, A&A 447, 863
- 6) De Breuck C., et al., 2000, A&A 362, 519
- 7) Nagao T., et al., 2003, AJ 125, 1729
- 8) Maiolino R., Nagao T., Marconi A., et al., 2006, Mem. S. A. It. 77, 643
- 9) Nagao T., et al., 2002, ApJ 575, 721
- 10) Shemmer O., Netzer H., Maiolino R., et al., 2004, ApJ 614, 547

Chemical Evolution of Active Galactic Nuclei

Tohru NAGAO

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: We introduce our recent research activities on the observational study of the metallicity evolution of active galactic nuclei (AGNs), which is a useful strategy to investigate the history of the cosmic metallicity evolution. Specifically we describe our two independent methods to measure metallicity in ionized gas nebulae of AGNs. Both methods result in the same conclusion, that the AGN metallicity positively correlates with the AGN luminosity but this relation does not show any redshift evolution up to $z \sim 4$.