

活動銀河中心核における電離領域の階層構造

長 尾 透

〈INAF—Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi 5, 50125 Firenze, Italy〉

〈日本学術振興会特別研究員 PD〉

e-mail: tohru@arcetri.astro.it

活動銀河中心核 (AGN) に存在する電離領域の物理化学状態は、しばしば観測されたスペクトルを光電離モデルで解釈しながら調べられます。この光電離モデルとしてどのようなものを考えればよいのか、また考えたモデルをどのように観測的に検証していけばよいのかを探る研究の一つの例として、AGN 中の電離領域の一つである狭輝線放射領域 (NLR) を対象とした筆者の研究をご紹介します。

1. はじめに

活動銀河中心核 (AGN) とは、銀河中心にあると考えられている超巨大ブラックホールに周囲のガスが落ち込んでいく際に形成される降着円盤においてガスの重力エネルギーを輻射に変えながら極めて明るく輝いている天体です。この降着円盤からの輻射には紫外線からエックス線、ガンマ線に至るまでの高エネルギー光子がたくさん含まれているのが特徴的で、こういった光子は周囲のガスを電離します。電離したガスからは電離領域の物理化学状態や電離光子のエネルギー分布に応じて実に多くの輝線がさまざまな強度比で放射されます。そのため、分光観測によってこの輝線スペクトルを詳細に調べていくことで、電離領域の物理状態や化学組成の情報を得ることができるはずです。

AGN の電離ガス領域は、ブラックホールに非常に近い (<0.1 光年) ため秒速 1,000 km 以上もの速さで激しく運動する高密度 (>10⁸ cm⁻³) ガス雲からなる広輝線放射領域 (Broad-Line Region; 以下 BLR と略記) と、それよりも外側に分布し母銀河と同程度の空間的スケールにまで広

がっていることもある狭輝線放射領域 (Narrow-Line Region; 以下 NLR) に分類されます。この NLR からの輝線がすべての AGN のスペクトルに見られるのに対して、BLR からの速度幅の広い輝線は一部の AGN にしか見られず、両方の輝線が見られる「1 型」AGN と NLR からの輝線しか見えない「2 型」AGN の関係については古くから関心が寄せられていました。しかし現在では図 1 に示したように、光学的にも幾何学的にも厚いダストトラスが BLR の周りに存在しているためにトラスに対して横から見た場合には BLR が隠されてしまって 2 型に見え、トラスに対して上下方向から見た場合には BLR が隠されずに見えて 1 型として認識されるという「AGN 統一モデル」が広く支持されています¹⁾。

BLR は空間的に解像して観測することは不可能なので、その構造や力学状態を知ることは容易ではありません。一方 NLR は天体によっては容易にその姿をとらえることができ、不均一なガス雲がコーン状の領域に分布している様子がしばしば観測されてきています^{2), 3)}。また NLR からの輝線は観測が比較的容易な可視域に数多く見られるため、その物理化学状態についても古くから研

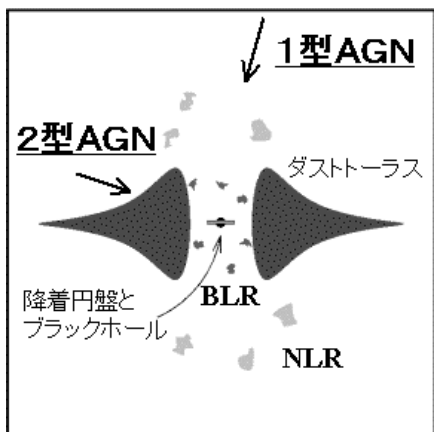


図1 AGN統一モデルで考えられている描像。ブラックホールの周りの降着円盤からの電離光子によって電離したガスのうち、ダストトラスの内側で高速運動するBLRはトラスに対して上下方向から見たときだけ観測され(1型AGN)、横方向から見た場合にはトラスに隠されて観測されません(2型AGN)。このBLRの中心核からの距離は0.1光年以下と考えられています。一方、空間的に広がって分布する電離ガス領域であるNLRは1型AGNでも2型AGNでも観測されます。このNLRは時には中心核から数千光年の距離まで広がっていることもあります。

究が行われています^{4),5)}。そのため、NLRについてはもう十分に理解できているのではないかとも思われがちです。しかし本稿ではこのNLRに焦点を当て、NLRがまだまだ目が離せない研究対象であることを紹介したいと思います。

2. 光電離モデルで探る電離領域

分光観測により得られた輝線スペクトルから電離ガスの物理化学状態を知るためには、光電離モデルを介する方法がよく取られます。これは、ある密度と厚みと化学組成をもつガス雲に対してある強度とエネルギー分布で電離光子を(計算機の中で)入射させ、ガス雲に生じる電離・再結合反応や電離光子の輻射輸送を数値実験的に追いかけることでガス雲がどのような電離構造になるかを

調べ、ガス雲全体から各種輝線がどのような強度比で放射されるかを計算する手法です。このような光電離モデルにはFerlandを中心とするグループが開発したCloudy⁶⁾というコードをはじめいくつかのコードが公開されており、数値計算になじみのない研究者でも容易に計算を行うことができます。NLRの状態を調べる最も単純な方法としては、均一な密度分布で特定の物理状態と特定の元素組成にあるガス雲で計算を行い、この「一領域」光電離モデルで見積もられる輝線スペクトルと観測された輝線スペクトルを比較して最適なモデルパラメーターを模索する方法が考えられます。こうした手法によって、可視域で強く観測される主な輝線は、密度が $10^{2.5} \text{ cm}^{-3}$ 程度で重元素量が太陽近傍での値か若干重元素組成量の多い一領域モデルでよく説明できることが知られています⁷⁾。

これで問題がないのであればNLRは単純なシステムなのだと理解してよいのかもしれませんが、そうは問屋が卸しません。実は単純な一領域モデルには、可視スペクトル中に微弱ながらも頻繁に観測される高階電離輝線の強度を説明できないという問題や、電離ガスの温度・密度の指標として重要な二階電離酸素輝線の強度比を説明できない問題があることが知られているのです^{8),9)}。特に後者の問題は深刻です。というのは、同一のイオンが放射する輝線強度比は、図2に示す遷移間の関係を考えてガス密度と温度の関数として一意的に決定されるべきもので(ただし化学組成や入射光子のエネルギー分布もガス温度に影響を与えるため間接的には効いてきます)、この基本的な輝線強度比さえ説明できないモデルには致命的な欠陥があると考えざるをえないからです(図3参照)。

いったい何が問題なのでしょう? これは半ば自明で、「一領域」という仮定があまりに単純すぎるからだと言ってほぼ間違いのないでしょう。観測結果を説明できる多領域モデルを考える必要があ

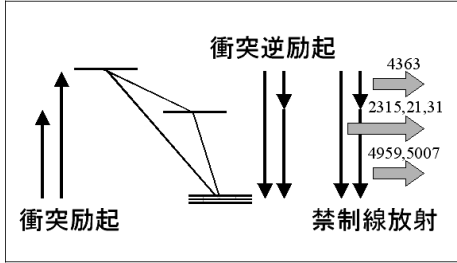


図 2 二階電離酸素イオンのエネルギー準位の一部。下の準位の状態にあるイオンは自由電子の衝突によってエネルギーを受け取って高いエネルギー準位に遷移します（衝突励起）。ガスの温度が高いと自由電子の平均エネルギーが大きくなるため、より高いエネルギー準位まで遷移する確率が増えます。高いエネルギー準位に遷移した後、再び衝突してきた自由電子にエネルギーを渡して下の準位に遷移するか（衝突逆励起）、自由電子にエネルギーを渡す前に禁制線を放射することでエネルギーを放出して下の準位に遷移します。このどちらの過程により下の準位に遷移するかはガスの密度に依存し、またその依存性は遷移ごとに異なります。

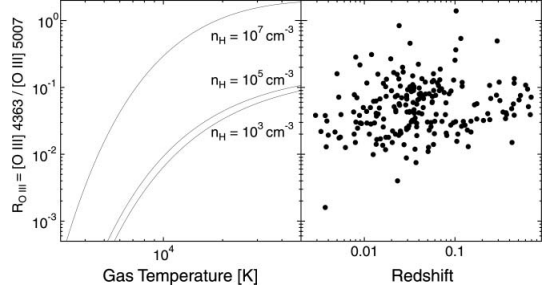


図 3 (左) 二階電離酸素イオンから放射される禁制線のうち、4,363 Åに見られる輝線と5,007 Åに見られる輝線の強度比 ($R_{[O III]}$) の理論値。ガス密度が 10^3 cm^{-3} , 10^5 cm^{-3} , 10^7 cm^{-3} の場合について、期待される輝線強度比をガスの温度の関数として示しています。光電離平衡にある NLR 中の電離ガスの温度は約 1 万度であることが期待されるので、NLR 中のガス雲が単純な一領域光電離モデルが予想する 10^3 cm^{-3} 程度の密度であれば、($R_{[O III]}$) の値は 0.01 程度であることが期待されます。(右) 観測されている ($R_{[O III]}$) を天体の赤方偏移の関数として示しています。ほとんどの天体では ($R_{[O III]}$) が 0.01 よりも大きく、理論値と合っていないことが分かります。

るわけですが、ではどのような多領域モデルを考えればよいのでしょうか？ これは非常に難しい問題です。これまでに、光学的に厚いガス雲と薄いガス雲を組み合わせたモデル¹⁰⁾や分布関数を与えて連続的に密度や中心核からの距離をガス雲にもたせるモデル¹¹⁾など、さまざまな多領域モデルが提案されています。しかしいずれもパラメータを増やすことで観測されている輝線強度比をうまく説明できるように作られているために、どのモデルがよりもっともらしいのか、なかなか区別をつけられないのです。

このような情勢の中で、観測されている輝線強度比とは別の情報を多領域モデル作りに反映させた興味深い論文が発表されました。それは、輝線強度比の AGN タイプへの依存性です。そもそも 1 型でしか見えない BLR (BLR が見えるというのがそもそも 1 型 AGN の定義だったわけですが) と違って NLR は 1 型 AGN でも 2 型 AGN でも観測されており、そのため NLR は光学的に

厚いダストトーラスよりも外側に広がっていると思われていました。そのため、トーラス軸と観測者の角度が NLR の見え方にどう影響を与えるのか、つまり NLR からの放射の AGN タイプへの依存性はあまり真剣には検討されてこなかったのです。ところが発表された論文では、起源となるイオンを作るために必要なエネルギー（電離ポテンシャル）が高い高階電離輝線は、1 型 AGN に比べて 2 型 AGN では系統的に弱く観測されるというのです¹²⁾。発表された論文の中で着目されたのは六階電離した鉄が放射する $[Fe VII]\lambda 6087$ という輝線でしたが、この輝線の強度が AGN タイプに依存するという事は、AGN 統一モデルの観点からはこの輝線を選択的に強く放射するガス雲がダストトーラスの内側に存在し、その見え方が観測者との角度に依存してしまっていることを示唆します。この論文に引き続いて発表された論文

では、主に低電離輝線を放射するガス雲と主に高電離輝線を放射するガス雲の2成分を考え、後者の成分はトーラス回転軸と観測者との角度によって見える程度が変わると考えることで観測されている輝線強度のAGNタイプへの依存性が定量的に説明できることも示されました¹³⁾。このモデルでは一領域モデルでは説明が困難だった強い[Fe VII] λ 6087放射強度を自然に説明できるという利点もあり、AGN統一モデルとの関係で自然な多領域化が図られているという点でも魅力的なものです。

筆者がこの考え方に興味をもったのは、東北大学天文学教室で修士課程に在籍していたときでした。さまざまな輝線強度比の観測データから各種光電離モデルのパラメーターに制限が与えられていくように、どんな輝線がAGNタイプに依存しどんな輝線はAGNタイプに依存しないかを系統的に調べることでNLRの光電離モデル作りのヒントを得られるのではないだろうか？と非常に安直に考えたのですが、どうも文献サーベイを試してみてもそのような依存性の調査は全くなされていないのです。NLRの分光観測はもう何百天体もなされてきているのに、なぜそんな基本的な調査がなされていないのかとても不思議だったのですが、その理由はすぐに分かりました。10天体、20天体といった規模のAGNの分光観測の報告はなされてきていますし、ある輝線にだけ注目して100天体規模で分光を行っている観測もあるのですが、さまざまな輝線を同一の観測手法により輝線のAGNタイプへの依存性を議論できる程度のサンプル数だけしっかり観測するという試みは、弱い輝線の強度測定にはある程度の質のスペクトルを取得しなければならぬということもあって、観測時間との兼ね合いで難しいのです。現在であればこういうときこそスローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)プロジェクトのデータリリースが威力を発揮できる場面なのですが、当時はまだSDSSのデータは公開されていませんでした。

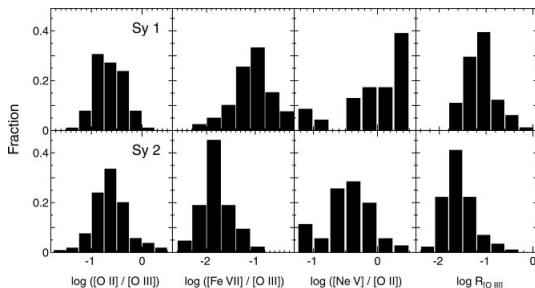


図4 各種輝線の強度比の頻度分布。左から右に向かって、一階電離酸素イオンが放射する輝線(3,727 Å)と二階電離酸素イオンの輝線(5,007 Å)の強度比、六階電離鉄イオンの輝線(6,087 Å)と二階電離酸素イオンの輝線(5,007 Å)の強度比、四階電離ネオンイオンの輝線(3,426 Å)と一階電離酸素イオンの輝線(3,727 Å)の強度比、 $R_{[O III]}$ (図3参照)の分子にあたる4,363 Åの輝線は分母にあたる5,007 Åの輝線よりも臨界密度が2桁近く高くなっています。上段が1型AGN、下段が2型AGNについてのヒストグラム。低電離輝線同士の強度比にはAGNタイプへの依存性が見られないこと、鉄イオンだけでなくネオンや酸素のイオンからの放射でもAGNタイプへの依存性が見られること、電離ポテンシャルが同じでも臨界密度が高ければAGNタイプへの依存性が見られることが分かります。

た。そこで筆者は、少々観測手法などがばらばらでもとにかくたくさん天体数を集めれば何か傾向が見えるのではないだろうか？とやや乱暴なことを考え、NLRの輝線スペクトルが報告されている過去の論文を片っ端から寄せ集め、輝線強度のデータを集めてみることにしました。

早速ADSサービスなどのオンライン検索にお世話になりながら350天体余りからなる輝線強度比のデータベースを作ってみたところ、鉄イオンの輝線だけでなく一般に電離ポテンシャルの高いイオンからの輝線は2型AGNに比べ1型AGNの方が強く見られること、また電離ポテンシャルがさほど高くなくても遷移の臨界密度(衝突逆励起が顕著になり禁制遷移が起きにくくなる特徴的な密度)が高い輝線は同様に2型AGNに比べ1

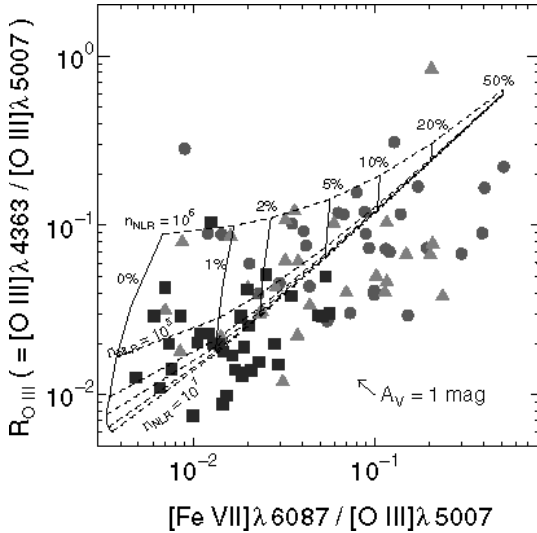


図 5 筆者らが提案した二領域光電離モデルによる予測と観測データを、六階電離鉄イオンの輝線 (6,087 Å) と二階電離酸素イオンの輝線 (5,007 Å) の強度比と $R_{[O III]}$ に注目して比較しています。高電離高密度ガス雲からの放射が二階電離酸素イオンの輝線 (5,007 Å) に寄与する割合が 0%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50% となるにつれてモデル予測値がこの図上で左下から右上に動いていくのが分かります。低密度成分の密度もパラメーターとなっています (図内に表示)。観測データは、丸印が 1 型 AGN, 四角印が 2 型 AGN, 三角印が中間的な 1.5 型 AGN, 観測データの方が系統的に図上で右下方向にずれているように見えますが、これは観測データにダスト赤化効果の補正を行っていないためです。典型的に A_V で 1 等級の赤化効果の補正を行うと、データ点は矢印で示した方向と長さだけ図上を動き、観測データとモデル予測値は近づきます。1 型 AGN は高電離高密度成分の寄与が 5~20% 程度、2 型 AGN は高電離高密度成分の寄与が 0~2% 程度のモデルでよく記述されています。

型 AGN の方が強く見られることが分かりました (図 4)¹⁴⁾。鉄に限らずいろいろなイオンの輝線で AGN タイプへの依存性が見られたということは、この効果が化学組成とは無関係なものであることを意味します。また、AGN タイプへの依存性が電離ポテンシャルと臨界密度の高さで決まっ

ているということは、トーラスよりも内側の領域に高電離で高密度なガス雲の成分が存在することを示唆しています。そこでこの情報を利用して、NLR の 2 成分光電離モデルを作ってみることにしました。考え方は先に述べた 2 成分モデルと同じく低電離で低密度な成分と高電離で高密度な成分を用意し、前者は可視スペクトルに強く見られる主要な低電離輝線強度を説明できるようなパラメーター (密度など) で、そこに後者の成分がある割合で加わっていくような描像です。この後者の密度などは、トーラスの内側が見えている 1 型 AGN での高電離ポテンシャル・高臨界密度の輝線 (鉄やネオン、酸素のイオンからの放射) の強度から制限を与えられるのが、今回さまざまな輝線について AGN タイプへの依存性を調べたことによる進展の一つです。結果の図を図 5 に示しますが、輝線強度比の AGN タイプへの依存性が高電離高密度成分の効き具合でよく表されていること、また過去の単純な光電離モデルでは説明が困難であった二階電離酸素輝線の強度比も自然に説明できることなど、さほど複雑でもないモデルによって観測をよく表現できていることが分かります¹⁵⁾。

3. 偏光分光観測で探る電離領域

前節で、筆者が修士課程に在籍中に行った光電離モデルによる NLR の研究の紹介をいたしました。しかし、ここまで読まれた読者の方の中には次のように思われる方もおられるかもしれません。「観測を説明できる光電離モデルが一つ増えただけじゃないのか? 他の多領域モデルよりもっともらしいモデル化ができていると言えるのか?」これはまさにそのとおりで、提案したモデルについて観測的に検証しなければ面白いとは言えません。ではどうすれば提案したモデルを観測的に検証できるでしょうか? 最も直接的には、トーラス内部が見通せている 1 型 AGN について、電離ポテンシャルあるいは臨界密度の高い輝

線がダストオーラスより内側の非常に中心核に近いところから、そして電離ポテンシャル・臨界密度の低い輝線が広がった領域から、それぞれ放射されている様子を撮像的にとらえるのがよいでしょう。しかし現在の観測技術ではダストオーラスの内壁よりさらに内側までも空間的に解像して観測することは、たとえ HST を使ったとしても困難です。空間的に解像できないオーラスの内側をのぞきこむ、そんなうまい方法はないのでしょうか？

オーラスの内側をのぞきこむ。こう聞いて思い出されるのは、AGN 統一モデルが観測的に支持されてきた歴史です。BLR の見られない 2 型 AGN について、光学的に厚いオーラスに隠された場所に BLR が存在していることを最初に明らかにしたのは偏光分光観測でした^{16)~18)}。オーラスの上下方向に向かって飛んでいく BLR からの放射が、自由電子に散乱されて偏光を受けて私たち観測者の元に届くため、通常のスペクトルには見られない BLR の輝線が偏光スペクトルの中にはっきりと見られるのです。この状況は、NLR について今想定している状況とよく似ています。散乱領域よりも内側にある NLR については、BLR と同様にある割合で偏光を受けることが期待されますが、2 型 AGN に注目すると、電離ポテンシャルや臨界密度が高ければ高いほどオーラスに隠されて直接光では見えにくくなるのがモデルからは予想されます。つまり輝線の臨界密度や起源となるイオンの電離ポテンシャルと「偏光度」との間に相関が生じることが期待されるわけです。実はこのような相関はクェーサーを中心にもつ超大光度赤外線銀河や LINER と呼ばれる一種の AGN で報告されたことがあるのですが^{19), 20)}、残念なことに近傍宇宙で最も典型的な AGN であるセイファート銀河ではこういった相関の有無を探る観測は一切行われていませんでした。これではモデルのチェックができないとがっかりしたちょうどその頃、すばる望遠鏡の微光天体分光撮

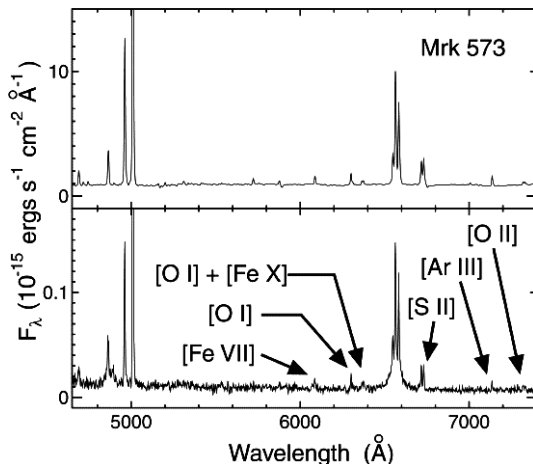


図 6 すばる望遠鏡に搭載された FOCAS で取得した観測データ。2 型セイファート銀河である Mrk 573 の直接光スペクトル（上段）と散乱光スペクトル（下段）を示しています。下段中では、検出された主な禁制線を矢印で示しています。なおここで示した散乱光スペクトルは、われわれの銀河系内のダストが原因で発生する偏光の効果を補正して Mrk 573 固有の偏光だけについて表示したものです。

像装置 (FOCAS)²¹⁾ が偏光分光観測モードを共同利用で開始すると聞き、早速観測提案を行うことにしました。

提案した観測は S03A 期に無事採択され二晩の割当てをいただいたのですが、残念ながら悪天候のため一切データを取得することができませんでした。しかしありがたいことに S03B 期にも同一課題で観測割当てをいただくことができたため、念願の偏光分光観測をようやく行うことができました。観測対象は近傍の 2 型セイファート銀河から選択し、1 天体あたり 3 時間を上回る積分時間を投入しました。可視で 14 等ないしは 15 等といった明るい天体に対してすばる望遠鏡の貴重な観測時間をこのように贅沢に注ぎ込むのは非常におそれ多いことだったのですが、しかし微弱な高電離輝線の偏光度を正確に測定するためには十分な量の光子を集めることが不可欠なのです。取得したスペクトルを解析した結果の一例を図 6 に示しますが、何とかぎりぎりのレベルで偏光スペクトル

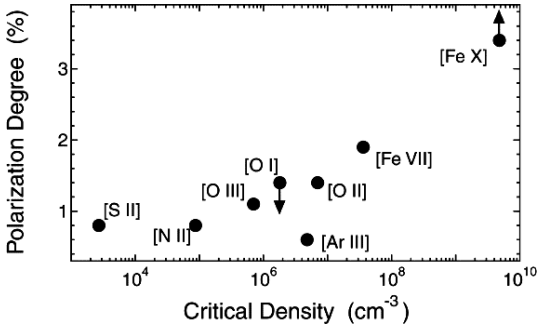


図 7 散乱光スペクトル中で検出された禁制線の偏光度を、その禁制線の遷移臨界密度の関数として示しました。上限値・下限値のデータは矢印で表現しています。各データ点の誤差は典型的には図中の黒丸と同程度かそれよりも小さいです。

中にも興味深い微弱な高電離輝線が受かっているのが分かります。そこでこの天体について各輝線の偏光度を出してみると、この偏光度が驚くほどきれいに輝線の臨界密度と正の相関を示している様子が見られました(図7)²²⁾。これはまさに、トラスを横から見ている2型AGN中のNLRについて、密度が高いガス雲ほどより内側に存在し、ダストトラスに隠されて見えなくなっていく様子をとらえていることにほかなりません。「トラスの内側をのぞき込む」という筆者の希望は、すばる望遠鏡のFOCASによる偏光分光観測によってかない、提案していたモデルが予想していたとおりの相関を見ることができました。

図7に示した輝線偏光度と遷移の臨界密度の間のきれいな正の相関は、提案していたモデルを支持する重要な観測事実ですが、ではここから私たちは何を学べるのでしょうか。一つは、図4に示したNLRの輝線強度比のAGNタイプへの依存性がNLRの階層構造とAGNの統一モデルから現れた「見かけの効果」であり、AGNタイプ間でNLRの性質が系統的に違っているわけではないと思ってよいという点です。1型AGNと2型AGNの間には本当にトラス回転軸に対する観測者からの角度しか違いがないのか、それとも中

心核近傍での星形成活動や母銀河との関係などAGN統一モデルからは予言されない違いが存在するのかについて、AGN統一モデルの検証やAGN進化といった関心との関係で活発な議論が続けられてきています^{23), 24)}。NLRからの放射のAGNタイプへの依存性についてもAGN統一モデルでは説明できないタイプ間でのNLRの固有の違いが原因なのだという論文も出されましたが²⁵⁾、今回の偏光分光観測の結果は禁制線強度比のAGNタイプへの依存性がAGN統一モデルに反する観測事実だというアイデアに対しては否定的なものになっています。もちろん確定的な判断を下すためには、もっと多くの天体について同様の観測を行い、図7に示したような関係が普遍的に見られるものなのかどうかを検討する必要があります。すばる望遠鏡のような大口径望遠鏡での偏光分光観測が可能となったことで、これまでは極めて難しかったAGNの微弱な禁制線の偏光特性の観測が進み、AGNの電離ガス領域やAGNの統一モデルとの関係で新しい知見が得られていくことが期待されます。

4. おわりに

本稿では、NLRについて理解を深めたいという試みについて、その一例をご紹介しました。NLRを正しく理解しモデルで記述することは、単にAGNについて詳細が分かるというだけでなく、NLRをAGNの種族もしくは赤方偏移ごとの化学組成の違いや、NLRを電離させている中心核からの連続波放射のエネルギー分布などを診断していくツールとして利用していくためにも欠かせません^{26), 27)}。SDSSのデータリリースも行われるようになった現在、統計的な観点でのAGNの電離領域に関する研究は飛躍的に進展することでしょう。筆者も引き続きこの分野での研究を楽しみたいと希望しています。

なお本稿は筆者が東北大学天文学教室で行った修士論文・博士論文研究の一部であり、指導教官

として谷口義明さんからご指導いただいたこと
 たいへん感謝しております。また東北大学天文学
 教室の村山 卓さんからは光電離モデル計算や電
 離ガスの物理についてご指導いただきました。本
 稿で紹介いたしました研究はこの二人の先駆的な
 研究を発展させたものです。また、すばる望遠鏡
 の FOCAS による偏光分光観測では、広島大学の
 川端弘治さんと FOCAS サポートアストロノマー
 であるハワイ観測所の大山陽一さんにたいへんお
 世話になりました。偏光分光観測の経験や知識
 を一切持ち合わせていなかった筆者が偏光分光
 の観測や解析を楽しく行えたのはこの二人のご
 協力があったからです。本稿で紹介した研究では
 Cloudy を使って光電離モデル計算を行っていま
 すが、このソースコードを天文学コミュニティー
 に公開して下さっており、またユーザーからの質
 問にも熱心に答えて下さっている G. Ferland さ
 んにはたいへん感謝をしております。最後に、筆
 者が経済的に援助を受けている日本学術振興会に
 深く感謝したいと思います。

参考文献

- 1) Antonucci R. R. J., 1993, ARA&A 31, 473
- 2) Capetti A., Axon D. J., Macchetto F. D., 1997, ApJ 487, 560
- 3) Schmitt H. R., et al., 2003, ApJS 148, 327
- 4) Ferland G. J., Netzer H., 1983, ApJ 264, 105
- 5) Storchi-Bergmann T., et al., 1998, AJ 115, 909
- 6) Ferland G. J., 1996, Hazy: A Brief Introduction to Cloudy
- 7) Ho L. C., Shields J. C., Filippenko A. V., 1993, ApJ 410, 567
- 8) Ferland G. J., Osterbrock D. E., 1986, ApJ 300, 658
- 9) Simpson C., et al., 1996, MNRAS 281, 509
- 10) Binette L., Wilson A. S., Storchi-Bergmann T., 1996, A&A 312, 365

- 11) Ferguson J. W., et al., 1997, ApJ 487, 122
- 12) Murayama T., Taniguchi Y., 1998, ApJ 497, L9
- 13) Murayama T., Taniguchi Y., 1998, ApJ 503, L115
- 14) Nagao T., Murayama T., Taniguchi Y., 2001, PASJ 53, 629
- 15) Nagao T., Murayama T., Taniguchi Y., 2001, ApJ 549, 155
- 16) Antonucci R. R. J., Miller J. S., 1985, ApJ 297, 621
- 17) Miller J. S., Goodrich R. W., 1990, ApJ 355, 456
- 18) Tran H. D., 1995, ApJ 440, 565
- 19) Barth A. J., et al., 1999, AJ 118, 1609
- 20) Tran H. D., Cohen M. H., Villar-Martin M., 2000, AJ 120, 562
- 21) Kashikawa N., et al., 2002, PASJ 54, 819
- 22) Nagao T., et al., 2004, AJ, 128, in press (astro-ph/0408254)
- 23) Heckman T. M., et al., 1989, ApJ 342, 735
- 24) Malkan M. A., Gorjian V., Tam R., 1998, ApJS 117, 25
- 25) Schmitt H. R., 1998, ApJ 506, 647
- 26) Nagao T., et al., 2002, ApJ 567, 73
- 27) Nagao T., et al., 2002, ApJ 575, 721

Stratified Structure of Ionized Gas Regions in Active Galactic Nuclei

Tohru NAGAO

INAF—Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo E. Fermi 5, 50125 Firenze, Italy

Abstract: Physical and chemical properties of ionized gas regions in active galactic nuclei have been frequently investigated by using photoionization models. We describe our attempt to make a new multi-zone photoionization model for narrow-line regions in active galactic nuclei and to explore its advantages over other proposed multi-zone photoionization models observationally.