

近赤外線分光観測に基づくセイファート銀河の狭輝線領域における 電離メカニズムへの制限

寺尾 航暉 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

Abstract

活動銀河核 (AGN) の狭輝線領域 (NLR) の電離メカニズムは、主に中心核からの電離光子による光電離であると考えられているが、電波ジェットなどに起因する衝撃波による衝突励起が電離に寄与している可能性も指摘されており、議論が続いている。観測から電離メカニズムを切り分ける方法として、近赤外線の $[\text{Fe II}] 1.257 \mu\text{m}/[\text{P II}] 1.188 \mu\text{m}$ 輝線強度比による診断が有用であると Oliva et al. (2001) で提案されている。衝撃波によって電離されたガスでは、ダスト破壊によりガス中の鉄の組成比が増加して輝線強度比は大きくなり ($\gtrsim 20$)、光電離されたガスでは小さい ($\lesssim 2$) ことが期待される。ところが、AGN におけるこの輝線強度比はこれまであまり調査されておらず、サンプル数が少ないために統計的な議論は進んでいない。本研究では、岡山天体物理観測所の近赤外線分光装置 ISLE を用いて近傍に存在するセイファート銀河 26 天体を分光観測し、得られた近赤外線スペクトルの解析を行った。その結果、下限値も含め合計 19 天体の輝線強度比を得た。さらに先行研究から 22 天体の輝線強度比のデータを収集し、合計 41 天体の輝線強度比サンプルを構築した。この結果から、多くの天体では光電離が主な電離メカニズムであるが、衝撃波の寄与が考えられる輝線強度比を示す天体も見つかり、実際に NLR の電離に衝撃波が寄与している天体が一定の割合で存在することが分かった。この衝撃波の起源について電波ジェットの活動性の強弱と輝線強度比の関係をしてみると、これらの間に相関は見られなかった。このことから、電波ジェットは衝撃波の主な起源ではないことが示唆された。他の候補の一つとして、放射立体角の大きいアウトフロー現象が考えられる。

1 Introduction

活動銀河核 (AGN) とは、銀河中心のごく狭い領域で極めて明るく輝いている天体で、そのエネルギー源は、超大質量ブラックホールへの質量降着であると考えられている。AGN からは様々な輝線が放射されており、輝線の速度幅が $10^2\text{--}10^3 \text{ km s}^{-1}$ 程度の輝線を放射する狭輝線領域 (NLR) は、中心核から $10^1\text{--}10^4 \text{ pc}$ という母銀河に匹敵する領域まで広がっており、銀河スケールにおける電離ガスの状態や化学進化の研究に非常に有用な道具として利用されてきた。

NLR の電離メカニズムは、中心核からの電離光子による光電離であるとする考えが広く支持されているが (Binette et al. 1996; Groves et al. 2004)、電波ジェットなどに起因する衝撃波が電離に寄与している可能性も指摘されている (Fu & Stockton 2007)。これまで可視光での分光観測によって電離メカニズムの調査が行われてきたが、観測結果を 2 つのメカニ

ズムに切り分けることがうまくいっていない。

その中で、Oliva et al. (2001) において近赤外線の J -band で観測されるリンと鉄の輝線である $[\text{P II}] 1.188 \mu\text{m}$ と $[\text{Fe II}] 1.257 \mu\text{m}$ の輝線強度比による診断が有用であると提案されている。この 2 本の輝線を用いる理由として以下のことが挙げられる。波長が近く同じ J -band で観測が可能であること。また、ともに禁制線であり、臨界密度、電離ポテンシャル、励起温度などの物理量がよく似ていることから、同じ物理状態の領域から放射されていることが期待できる。鉄は難溶性物質として知られており、そのほとんどがダストに閉じ込められている。一方リンは易溶性物質で、ダストへの吸着が比較的生じにくいいためガス中に存在できる。このため、ダストを破壊できる衝撃波の有無により、ガス中の鉄とリンの存在比が変化し、輝線強度比も変化することが期待される。実際に衝撃波が卓越している超新星残骸では超新星残骸では $[\text{Fe II}]/[\text{P II}]$ の輝線強度

比は大きく (> 20)、光電離が卓越している $H II$ 領域からは小さい値 (< 2) が観測されている (Oliva et al. 2001)。このことから、衝撃波によって電離されたガスでは、 $[Fe II]/[P II]$ 輝線強度比が大きく ($\gtrsim 20$)、光電離されたガスでは小さい ($\lesssim 2$) ことが期待され、実際の NLR では衝撃波の寄与の違いによって、 $2 \lesssim [Fe II]/[P II] \lesssim 20$ の範囲に分布すると考えられる (e.g., Hashimoto et al. 2001)。

この衝撃波の起源は、近年話題になっている AGN feedback に対応する現象が考えられ、母銀河の星間物質への feedback が NLR の衝撃波による電離として見えている可能性がある。そのため、NLR における衝撃波の影響を調査することは、AGN feedback の理解に繋がる可能性もあるため非常に重要である。

ところが、AGN におけるこの輝線強度比はあまり調査されておらず、サンプル数が少ないために統計的な議論はほとんど進んでいない。そこで本研究では、近傍 AGN 26 天体の中心核領域を近赤外線分光観測し、得られたスペクトルを解析することで、 $[Fe II]/[P II]$ 輝線強度比を用いて NLR の電離メカニズムへの衝撃波の影響を調査した。

2 Observations

観測は 2010 年 8 月、2011 年 1, 3, 4 月に岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡の近赤外撮像分光装置 ISLE (Yanagisawa et al. 2006, 2008) を用いて行った。観測条件は、 J -band ($1.11\text{--}1.32 \mu\text{m}$)、スリット幅 $2.0''$ 、波長分解能 ~ 1300 、典型的なシーイングサイズは $\sim 1.0'' - 2.0''$ であった。観測天体の赤方偏移、activity type、積分時間、観測日時を表 1 にまとめた。積分時間はデータ解析に使用したデータの総積分時間を示している。

3 Results

データ解析には、IRAF を使用し、一般的な近赤外線データのデータ整約に沿って行った。その結果、観測を行った 26 天体中、19 天体で $[Fe II]$ 、6 天体で $[P II]$ を検出した。 $[P II]$ が未検出の場合は 3σ の上限値を与え、 $[Fe II]/[P II]$ 輝線強度比の下限値を求めている。

表 1: 観測天体

Name	z	Type	積分時間 (min)
NGC 1667	0.0152	Sy 2	114
NGC 2273	0.0061	Sy 2	94
NGC 2782	0.0085	Sy 2	552
NGC 3079	0.0037	Sy 2	68
NGC 3982	0.0037	Sy 1.9	18
NGC 4102	0.0028	LINER	110
NGC 4169	0.0126	Sy 2	68
NGC 4192	-0.0005	LINER	48
NGC 4258	0.0015	Sy 2	48
NGC 4388	0.0084	Sy 2	36
NGC 4419	-0.0009	LINER	60
NGC 4941	0.0037	Sy 2	48
NGC 5005	0.0032	LINER	100
NGC 5194	0.0015	Sy 2	168
NGC 5506	0.0062	Sy 2	212
NGC 6500	0.0100	LINER	208
NGC 6951	0.0048	Sy 2	74
Mrk 3	0.0135	Sy 2	56
Mrk 6	0.0188	Sy 1.5	64
Mrk 34	0.0505	Sy 2	26
Mrk 463	0.0504	Sy 2	160
Mrk 477	0.0377	Sy 2	84
Mrk 509	0.0344	Sy 1.5	166
Mrk 766	0.0129	Sy 1	84
Mrk 1073	0.0233	Sy 2	288
MCG +08-11-011	0.0205	Sy 1.5	100

下限値も含め合計 19 天体で輝線強度比を得ることができた。19 天体の内、輝線強度比の最大値は Mrk 463 の > 17.93 で、最小値は Mrk 1073 の 2.460 ± 0.166 、平均値は 6.46 である。図 1 に Mrk 463 のスペクトルを載せた。横軸は静止系波長、縦軸は $1.235 \mu\text{m}$ 付近の連続光で規格化した値になっている。得られた近赤外線スペクトルの内、一例として $[Fe II]$ 、 $[P II]$ とともに検出されている 6 天体を図 2 に載せた。

また、先行研究からは 22 天体の輝線強度比のデータを収集した。(Ramos Almeida et al. 2006, 2009; Riffel et al. 2006, 2013; Jackson & Beswick 2007; Krajinovic et al. 2007; Hashimoto et al. 2011; Riffel & Storchi-Bergmann 2011; Schönell et al. 2014)。

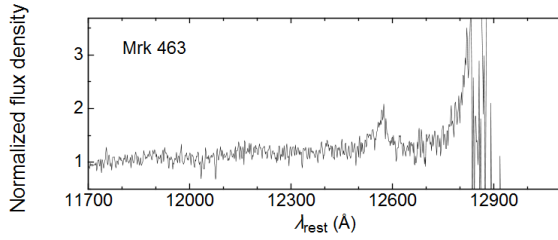


図 1: [P II] 輝線強度の上限値から示唆される [Fe II]/[P II] 輝線強度比の下限値が最も大きい Mrk 463 のスペクトル。横軸は静止系波長、縦軸は $1.235 \mu\text{m}$ 付近の連続光で規格化したものになっている。

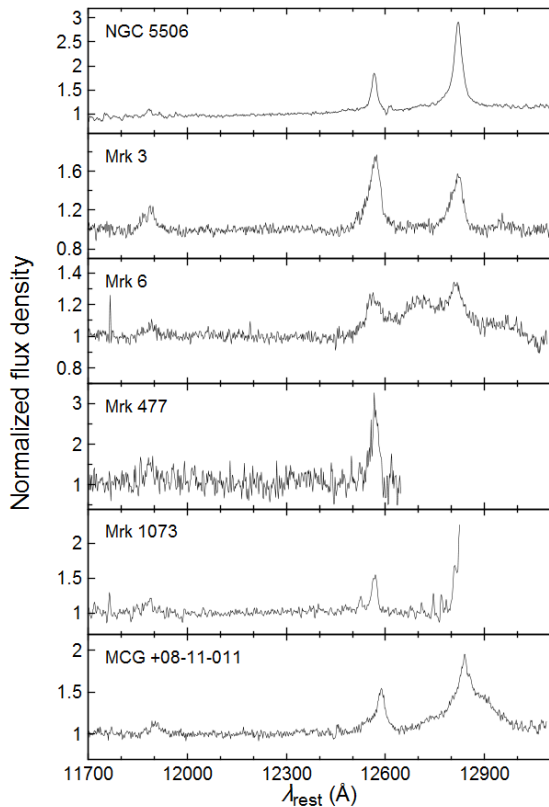


図 2: [Fe II]、[P II] とともに検出されている天体のスペクトル。縦軸、横軸は図 1 と同じ。

この結果、本研究と先行研究を合わせて合計 41 天体の輝線強度比サンプルを構築することができた。得られた輝線強度比あるいはその下限値の情報をヒストグラムにまとめたものを図 3 に示す。

4 Discussion

得られた結果から、多くの天体では輝線強度比が小さく ($\lesssim 2$)、光電離が主な電離メカニズムであると考えられる。しかし、我々の観測によってこれまで見つかっていなかった高い輝線強度比 ($\gtrsim 10$) を示す天体が見つかった (図 3)。これらの天体では、衝撃波が電離に寄与している可能性が考えられる。このことから、実際にセイファート銀河の NLR において衝撃波が電離に寄与している天体が一定の割合で存在することが分かった。

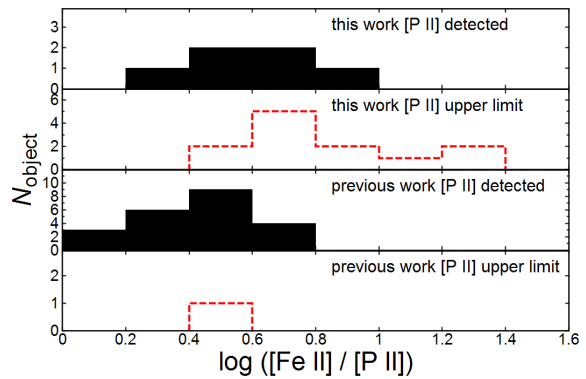


図 3: 41 天体の [Fe II]/[P II] 輝線比のヒストグラム。黒は [P II] が検出されているもの、赤点線は [P II] が未検出で 3σ の上限値を与えて輝線強度比を求めたものになっている。

この NLR における衝撃波の起源の候補として、電波ジェットについて議論する。以下のように可視光と電波の強度比で定義した radio loudness (R) は電波ジェットの強弱の指標となる。

$$R = \frac{5 \text{ GHz flux density}}{4400 \text{ Å flux density}} \quad (1)$$

この radio loudness と輝線強度比との関係 (図 4) を見てみると、これらの間に相関は見られなかった。また、高い輝線強度比を示す天体は幅広い R の値を示している。このことから、電波ジェットが起源である衝撃波によって電離されている可能性が低いことが示唆される。

そのため、別の衝撃波の起源としては、放射立体角の大きい broad absorption line (BAL) や ultra-fast outflow (UFO) などのアウトフロー現象が一つの候補

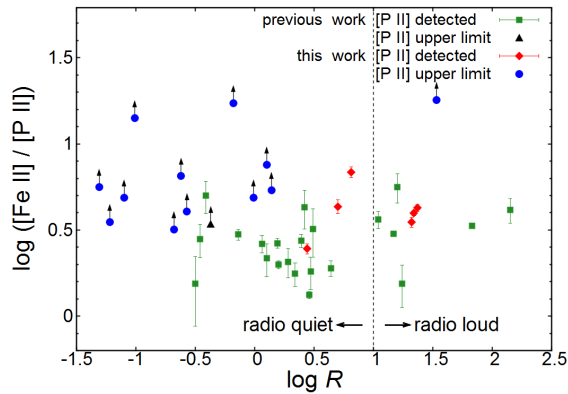


図 4: $[\text{Fe II}]/[\text{P II}]$ 輝線比と radio loudness の関係。点線は、radio loud と radio quiet の境界を示す。

として考えられる。特に UFO は近傍セイファート銀河の $\sim 35\%$ で観測されている (Tombesi et al. 2010)。これらアウトフロー現象が NLR のような外側にまで広がり、電離に影響を及ぼしている可能性があるが、実際に実現可能なモデルであるか検証が必要である。

5 Conclusion

我々は近傍 AGN 26 天体の中心核領域の近赤外分光観測を行い、下限値も含め 19 天体で $[\text{Fe II}]/[\text{P II}]$ 輝線強度比を得た。また、先行研究から 22 天体の輝線強度比のデータを集め、合計 41 天体の輝線強度比サンプルを構築した。

この結果から、多くの天体では光電離が主な電離メカニズムであると考えられるが、衝撃波が電離に寄与していると考えられる天体が一定の割合で存在することが分かった。この衝撃波の起源について、輝線強度比と radio loudness の関係を見ると、相関が見られなかったため、電波ジェットが主な衝撃波の起源である可能性が低いことが示唆された。別の起源として、放射立体角の大きいアウトフロー現象が一つの候補として考えられる。今後は、電波及び近赤外での高空間分解観測によって星間物質の物理状態を直接観測することで衝撃波の起源について探っていく、NLR における衝撃波の影響の理解を進める。また、光電離のモデル計算を行い、 $[\text{Fe II}]/[\text{P II}]$ がどのような値を示すか検証を行っていく。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Binette, L., et al. 1996, A&A, 312, 365
 Boselli, A., et al. 2014, A&A, 564, 67
 Fu, H., & Stockton, A. 2007, ApJ, 666, 794
 Groves, B. A., et al. 2004, ApJS, 153, 75
 Hardcastle, M. J., et al. 2003, ApJ, 593, 169
 Hashimoto, T., et al. 2011, PASJ, 63, L7
 Jackson, N., et al. 2007, MNRAS, 376, 719
 Krajnović, D., et al. 2007, MNRAS, 374, 385
 Oliva, E., et al. 2001, A&A, 369, L5
 Ramos Almeida, C., et al. 2006, ApJ, 645, 148
 Ramos Almeida, C., et al. 2009, ApJ, 694, 1379
 Riffel, R. A., et al. 2006, A&A, 457, 61
 Riffel, R. A., & Storchi-Bergmann, T. 2011, MNRAS, 417, 2752
 Riffel, R. A., et al. 2013, MNRAS, 430, 2249
 Schönnell, A. J., et al. 2014, MNRAS, 445, 414
 Tombesi, F., et al. 2010, A&A, 521, AA57
 Véron-Cetty, M.-P., & Véron, P. 2010, A&A, 518, 10
 Yanagisawa, K., et al. 2006, Proc. SPIE, 6269, 62693Q
 Yanagisawa, K., et al. 2008, Proc. SPIE, 7014, 701437