

## 輝線診断図による低金属量 AGN 探査

川崎 光太 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

### Abstract

狭輝線領域 (NLR) の金属量が低い活動銀河核 (AGN) は進化の初期段階にあると考えられ、非常に興味深い天体である。しかし、NLR の金属量が低い AGN は非常に稀である。こうした低金属量 AGN を選択するために BPT 図と呼ばれる可視光輝線診断図 ( $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$  vs.  $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ ) を用いる方法がある。理論モデルによると、NLR の金属量が太陽程度以下である低金属量 AGN は、天体がほとんど存在しない『BPT valley』に位置することが示唆されている。しかし、高い電子密度・電離パラメータをもつ AGN、あるいは高い電子密度・電離パラメータ・ハードな電離光子スペクトルをもつ星形成銀河も BPT valley に位置するため、BPT valley にいる天体が必ずしも低金属量 AGN だけではないという問題がある。

本研究では BPT valley にある天体の可視輝線スペクトルを調査し、BPT valley にいる天体が低金属量 AGN なのかどうかを検討する。Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 (SDSS DR7) から選んだ低赤方偏移の輝線銀河  $\sim 213,000$  天体から、BPT valley にある 70 天体を選択した。このうちスペクトルに広輝線が He II が見られる 46 天体を AGN であると判断した。この AGN サンプルに対して、電子密度は  $[\text{S II}]$  輝線比、電離パラメータは  $[\text{O III}]/[\text{O II}]$  輝線比を用いて診断を行った。その結果、電子密度や電離パラメータの効果で BPT valley に位置する AGN はほとんど存在しないことが分かった。以上より、BPT valley にある天体のうち少なくとも 65% は低金属量の NLR を持つ AGN であることが明らかになった。

## 1 Introduction

活動銀河核 (AGN; active galactic nucleus) とは、超巨大ブラックホール (SMBH; supermassive black hole) への質量降着による重力エネルギー開放によって明るく輝く天体である。SMBH の質量と母銀河の質量には強い相関があり (Marconi & Hunt 2003)、それは SMBH と銀河が密接に相互作用しながら進化してきたことを示唆している (SMBH と銀河の共進化)。狭輝線領域 (NLR; narrow line region) の低金属量な AGN は共進化の初期段階にあると考えられ、共進化を考える上で非常に興味深い天体である。しかし、低金属量な AGN は非常に稀である (Nagao et al. 2006; Matsuoka et al. 2009)。

NLR が放射する輝線スペクトルは極紫外線による影響を大きく受ける。Baldwin, Phillips, & Terlevich (1981) らは星形成銀河と AGN を分けることができる可視光輝線診断図 ( $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$  vs.  $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ ) を提案した (BPT 図)。Groves et al. (2006) は、BPT 図を用いて Sloan Digital Sky Survey Data Release 4 (SDSS DR4) の  $\sim 8,000$  天体の 2 型セイファー

ト銀河から  $\sim 40$  天体の低金属量 AGN を選出した。理論モデルによると金属量が太陽程度以下である低金属量 AGN は、天体がほとんど存在しない『BPT valley』に位置することが示唆されている (図 1)。しかし、高い電子密度・電離パラメータをもつ AGN、あるいは高い電子密度・高い電離パラメータ・ハードな電離光子スペクトル・高い N/O 比・shock をもつ星形成銀河も BPT valley に位置するため (e.g., Nagao et al. 2001; Kewley et al. 2013)、BPT valley にいる天体が必ずしも低金属量 AGN だけではないという問題がある。

本研究は BPT valley にある天体が低金属量 AGN なのかどうかを明らかにすることが目的である。このためにまず、SDSS DR7 から BPT valley sample を選択する。次に、星形成銀河の汚染を回避するために BPT valley sample から AGN を選択する。最後に、選択した AGN が高い電子密度・高い電離パラメータが原因で BPT valley に位置していないかを調べることで BPT valley sample から低金属量 AGN を選択する。

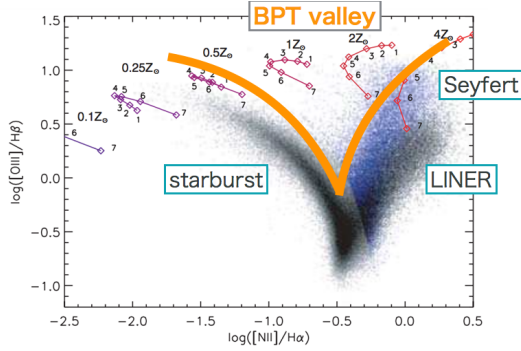


図 1:  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$  vs.  $[\text{O III}]/\text{H}\beta$  の BPT 図と BPT valley. 金属量が減少すると  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$  も減少し、 $\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) < -0.5$  では  $Z \lesssim 1 Z_{\odot}$  である (Groves et al. 2006). 背景は SDSS DR4 の輝線銀河である。

## 2 Methods and Results

### 2.1 Sample selection

サンプルは Groves et al. (2006) の方法にしたがって選択した。今回は、MPA-JHU SDSS DR7 galaxy catalog の 927,552 天体の分光データを用いた。

1. 赤方偏移  $z > 0.02$  の天体を選択 ( $\sim 910,000$  天体)
2.  $\text{H}\beta$   $\lambda 4861$ ,  $[\text{O III}]\lambda 5007$ ,  $[\text{O I}]\lambda 6300$ ,  $\text{H}\alpha$   $\lambda 6563$ ,  $[\text{N II}]\lambda 6584$  が  $\text{S/N} > 3$  の天体を選択 ( $\sim 213,000$  天体)

3. Kauffmann et al. (2003) の経験的分類線より

$$\log\left(\frac{[\text{O III}]}{\text{H}\beta}\right) > \frac{0.61}{[\text{N II}]/\text{H}\alpha - 0.05} + 1.3$$

の天体を選択 ( $\sim 56,000$  天体)

4. Kewley & Dopita (2001) の理論的分類線より

$$\log\left(\frac{[\text{O III}]}{\text{H}\beta}\right) > \frac{0.61}{[\text{N II}]/\text{H}\alpha - 0.47} + 1.19$$

の天体を選択 ( $\sim 23,000$  天体)

5. Kewley et al. (2006) の経験的分類線より

$$\log\left(\frac{[\text{O III}]}{\text{H}\beta}\right) > 1.36 \log\left(\frac{[\text{O I}]}{\text{H}\alpha}\right) + 1.4$$

の Seyfert sample を選択 ( $\sim 14,000$  天体)

6.

$$\log\left(\frac{[\text{N II}]}{\text{H}\alpha}\right) < -0.5$$

の BPT valley sample を選択 (70 天体)

選択したサンプルを  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$  vs.  $[\text{O III}]/\text{H}\beta$  の BPT 図上にプロットした (図 2)。

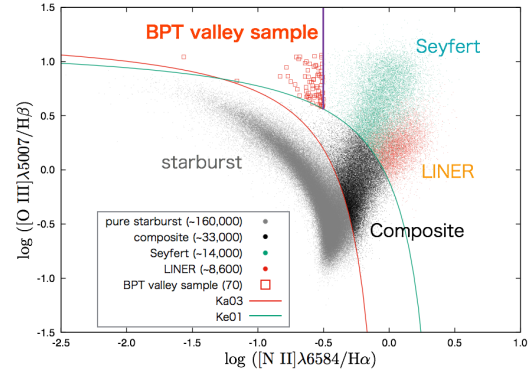


図 2:  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$  vs.  $[\text{O III}]/\text{H}\beta$  の BPT 図と BPT valley sample. 丸括弧内はそれぞれの天体数を表す。背景は SDSS DR7 の輝線銀河である。

### 2.2 BPT valley sample

#### 2.2.1 selection of pure AGN sample

BPT valley には、高い電子密度・高い電離パラメータなどをもつ星形成銀河も位置することが示唆されている。したがって、BPT valley sample から AGN を選択することで星形成銀河の汚染を回避する。今回は、(1)  $\text{H}\alpha$  輝線に広輝線成分がみられる (2)  $\text{He II } \lambda 4686$  が受かっているの少なくともどちらか一方の条件を満たす天体を AGN であると判断した。

まず、広輝線成分について議論する。もし、水素の再結合線に広輝線成分 ( $\text{FWHM} \gtrsim 2000 \text{ km/s}$ ) が見られれば、AGN の存在が示唆される。そこで、 $\text{H}\alpha$  の広輝線成分を探すために、BPT valley sample の可視光スペクトルデータを解析した。広輝線成分の有無については 2 パターンのフィッティングを行なった際の reduced chi-square に基いて判断した。その結果、広輝線成分を持つ BPT valley sample は 17 天体であった。

次に He II について調査する。He II  $\lambda 4686$  の電離エネルギーは 54.4 eV ( $\lambda \sim 228 \text{ \AA}$ ) と高く、ハードな放射である。ハードな放射は AGN によってもたらされる。したがって、He II  $\lambda 4686$  は AGN の指標となる。He II が受かっているかは目で見て判断した。目で判断できない天体については、フィッティングをして He II が  $S/N > 5$  の天体を He II が受かっていると判断した。その結果、He II が受かっている BPT valley sample は 38 天体であった。

これらの結果から、少なくとも広輝線と He II のどちらか一方がある天体を AGN だと判断すると、70 天体の BPT valley sample のうち少なくとも 46 天体は AGN であることが分かった。

## 2.2.2 selection of low metallicity AGN

BPT valley にいる AGN は低金属量ではなく、高い電子密度・高い電離パラメータをもつ AGN である可能性が否定できない。そこで、BPT valley sample の電子密度・電離パラメータを典型的な Seyfert sample と比較する。

最初に、電子密度について議論する。[S II]  $\lambda 6717/\lambda 6731$  の輝線強度比は電子温度への依存性が小さく、電子密度のよい指標となる (Osterbrock 1989)。したがって電子温度が  $10^4 \text{ K}$  であると仮定して、[S II] の輝線強度比から電子密度を推定した。BPT valley sample と Seyfert sample の電子密度のヒストグラムを図 3 に示す。BPT valley sample と Seyfert sample の電子密度の median はそれぞれ  $\sim 210 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\sim 270 \text{ cm}^{-3}$  であった。よって BPT valley sample の電子密度は典型的な Seyfert のものより大きくなかった。したがって、AGN が BPT valley にいる原因は電子密度が高いからではないことが分かった。

次に電離パラメータについて議論する。電離パラメータとは、電離光子の数密度とガスの密度との比のことでガスの電離度を表す。[O III]  $\lambda 5007/[\text{O II}] \lambda 3726$  の輝線強度比は電離パラメータのよい指標となることが知られている (Komossa & Schulz 1997)。[O III]  $\lambda 5007$  と [O II]  $\lambda 3726$  は波長間隔が広いので赤化の補正が必要がある。今回は Cardelli et al. (1989) の赤化曲線を採用して、赤化を受けていない場合の

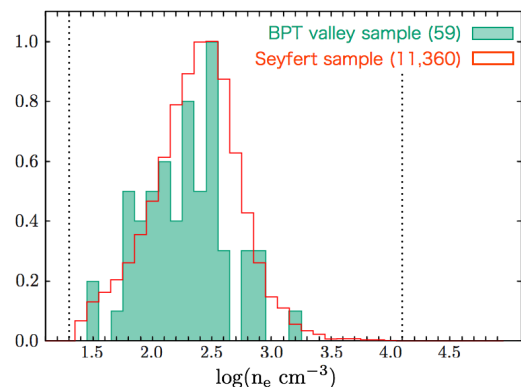


図 3: BPT valley sample と Seyfert sample の電子密度のヒストグラム。丸括弧内はヒストグラムに用いた天体数を表す。縦軸は、BPT valley sample は 10, Seyfert sample は 1380 で規格化した天体数である。

輝線強度比として  $H\alpha/H\beta = 3.1$  を仮定して赤化補正を行なった (Groves et al. 2006)。BPT valley sample と Seyfert sample の [O III]  $\lambda 5007/[\text{O II}] \lambda 3726$  の輝線強度比のヒストグラムを図 4 に示す。ただし、[O III] の選択効果をなくするために Seyfert sample は  $\log([\text{O III}]/H\beta) > 0.5$  のサンプルのみを用いた。BPT valley sample と Seyfert sample の  $\log([\text{O III}] \lambda 5007/[\text{O II}] \lambda 3726)$  の median はそれぞれ  $\sim 0.65$ ,  $\sim 0.46$  であった。よって BPT valley sample の電離パラメータは典型的な Seyfert のものより大きくなるという結果が得られた。しかし、理論モデルより AGN が電離パラメータが原因で BPT valley くるためには  $\log U > -2.5$  でなければならない (Nagao et al. 2001)。しかし BPT valley sample の電離パラメータは  $\log U < -2.5$  である。したがって、BPT valley sample の AGN は電離パラメータが原因で BPT valley にいるのではないことが分かった。

## 3 Conclusion and Discussion

太陽金属量程度の低金属量 AGN が位置すると期待される BPT valley にいる天体を選択することで低金属量 AGN を選択することを試みた。しかし、BPT valley には星形成銀河による汚染と低金属量でない AGN による汚染の問題がみられる。そこで、BPT valley sample から AGN を選択することで星形成銀

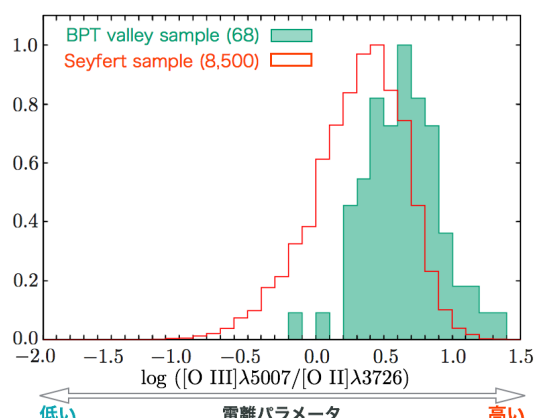


図 4: BPT valley sample と Seyfert sample の  $[\text{O III}]/[\text{O II}]$  のヒストグラム。丸括弧内はヒストグラムに用いた天体数を表す。縦軸は、BPT valley sample は 11, Seyfert sample は 1644 で規格化した天体数である。

河の汚染による問題を、高い電子密度・高い電離パラメータが原因で BPT valley に AGN がいるのではないことを示すことによって低金属量でない AGN による汚染の問題を回避した。最終的に  $\sim 213,000$  天体の輝線銀河から 46 天体の低金属量 AGN を選択することができた。したがって、BPT 図を用いた低金属量 AGN 探索は有効な手段であるということが分かった。

ただし、今回低金属量 AGN を選択する際に注意しなければならない点がある。電子密度を推定するときに  $[\text{S II}]\lambda 6717, 31$  の輝線強度比を用いたが、BPT 図の位置に関係する電子密度は  $[\text{N II}]\lambda 6584$  が放射される領域のもので、 $[\text{S II}]$  と  $[\text{N II}]$  ではトレースしている領域が異なる。 $[\text{N II}]$  の領域と比較的近い  $[\text{O II}]\lambda 3726, 29$  の輝線強度比を用いて電子密度を推定する方法もあるが、 $[\text{O II}]$  の 2 重線は波長間隔が狭く、2 つを分離するためには高い波長分解能が必要とされ難しい。したがって、BPT valley sample に対して高い波長分解能での観測を、今後行なっていくことが重要であると考えられる。また、今回の研究で低金属量 AGN だと分かった天体に対して母銀河の性質を調べることで共進化の初期段階についても調査していきたい。

## 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

- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R., 1981, PASP, 93, 5
- Groves, B. A., Heckman, T. M., & Kauffmann, G. 2006, MNRAS, 371, 1559
- Kauffmann, G. et al., 2003, MNRAS, 346, 1055
- Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Heisler, C. A., Trevena, J., 2001, ApJ, 556, 121
- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., & Heckman, T. 2006, MNRAS, 372, 961
- Kewley, L. J., Dopita, M. A., Leitherer C., Davé, R., Yuan, T., Allen, M., Groves, B., Sutherland, R., 2013a, ApJ, 774, 100
- Komossa, S., Schulz, H., 1997, A&A, 323, 31
- Marconi, A., & Hunt, L. K. 2003, ApJ, 589, L21
- Matsuoka, K., Nagao, T., Maiolino, R., Marconi, A., & Taniguchi, Y. 2009, A&A, 503, 721
- Mendoza, C. 1983, in IAU Symp. 103, Planetary Nebulae, ed. D. R. Flower (Dordrecht: Reidel), 143
- Nagao, T., Murayama, T., & Taniguchi, Y. 2001, ApJ, 546, 744
- Nagao, T., Maiolino, R., & Marconi, A. 2006, A&A, 459, 85
- Osterbrock, D. E. 1989, Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei (Mill Valley, CA: Univ. Science Books)