

高赤方偏移の低光度クェーサー探査における コンプリートネスと光度関数の再評価

仁井田 真奈 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

Abstract

巨大ブラックホールの進化を解明するためには、宇宙の様々な時代において広い光度範囲のクェーサー光度関数を求めることが重要である。クェーサーは AGN の中でも最も明るいクラスの天体であり、幅広い時代のクェーサー光度関数が求められてきた。しかし巨大ブラックホールの成長初期に対応する遠方の低光度クェーサーの光度関数は系統誤差を多く含むなどの理由により、正確な光度関数が得られていない。我々は光度関数を導出する上で重要なコンプリートネスの測定において系統誤差が生じる原因に注目した。一つはクェーサースペクトルの光度依存性を考慮していない点であり、もう一つはクェーサーモデルスペクトルに適用させる銀河間物質 (intergalactic medium; IGM) の旧来のモデルが吸収を過大評価している点である。

そこで本研究ではこの 2 点を改善し、より正確な遠方の低光度クェーサー光度関数の導出方法の確立を目的とした。我々は SDSS のクェーサーカタログを用いて定量化したスペクトルの光度依存性の情報と、最近の観測結果に基づく IGM の吸収モデルを用いて、COSMOS 領域のデータから $z \sim 4, 5$ におけるコンプリートネスを導出した。その結果、低光度のクェーサーほど二色図上で選出されやすく、コンプリートネスが影響を受けることが分かった。導出したコンプリートネスを使用することで、従来の導出方法によって生じる系統誤差の除去に成功し、その結果各赤方偏移のクェーサー個数密度に約 25% の増減があった。本講演では導出方法の詳細に加え、導出した光度関数に基づくクェーサーの個数密度進化やすばる望遠鏡の超広視野カメラ (Hyper Suprime-Cam; HSC) を用いた今後の展望について議論する。

1 Introduction

活動銀河核は巨大ブラックホールにガスが降着する際にその重力エネルギーが放射に変換されて輝く天体であり、その光度は巨大ブラックホールの質量と相関がある。したがってクェーサーの個数密度を光度ごとに各時代で導出することにより、巨大ブラックホールの質量成長史を知ることができる。最近の観測により、幅広い光度範囲で宇宙の各時代におけるクェーサーの光度関数が求められてきた。特に高光度クェーサーの光度関数により、クェーサーの個数密度は $z \sim 7$ から $z \sim 2$ に向けて増加した後、現代に向けて減少していることが分かっている (Croom et al. 2009)。また、より高光度クェーサーほど高赤方偏移で個数密度のピークを迎えることが分かっており (AGN down-sizing)、これは質量が大きい巨大ブラックホールほど早期に成長のピークを迎えることを示す。しかし、高赤方偏移の低光度クェーサー

の光度関数は系統誤差を多く含む等の理由によりまだ正確には分かっていない。

我々は高赤方偏移の低光度クェーサー光度関数に含まれる系統誤差の原因として、コンプリートネスの導出方法における以下の 2 点に注目した。一つは、従来の導出方法ではクェーサースペクトルの光度依存性が考慮されていない点である。クェーサースペクトルは低光度のものほど輝線等価幅が大きいという光度依存性 (the Baldwin effect; Baldwin 1977) を持つが、従来の方法では光度に依らない典型的なスペクトルが用いられてきた。もう一つは、クェーサーのモデルスペクトルに適用させる旧来の IGM 吸収モデルが吸収を過大評価している点である (Inoue et al. 2014)。そこで本研究ではこの 2 点の影響を考慮することで従来の導出方法に含まれる系統誤差を取り除き、より正確な高赤方偏移の低光度クェーサー光度関数を導出した。

2 Methods

まず、キューサースペクトルの光度依存性を定量化するために、光度ごとにコンポジットスペクトルを作成した。Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) キューサーカタログ (Pâris et al. 2012) の 87,822 天体から、 $2 < z < 5$ における $-31 \leq M_i [z = 2] < -23$ ($z = 2$ K -corrected i -band mag) の 43,953 個のキューサーを用いた。異なる等級の 8 つのコンポジットスペクトルを作成し (図 1)、各スペクトルの $EW_{\text{rest}}(\text{C IV})$ の平均値と分散を測定することで光度依存性の定量化を行った。

次に光度ごとのキューサーモデルスペクトルを作成し、コンプリートネスのシミュレーションを行った。測定したコンポジットスペクトルの $EW_{\text{rest}}(\text{C IV})$ と連続光のべき指数 α_ν を正規分布を持つパラメータとして、モンテカルロシミュレーションを用いることでモデルスペクトルを作成した。モデルスペクトルに適合させる IGM 吸収モデルは、旧来のモデル (Madau 1995) と最近の観測データに基づくモデル (Inoue et al. 2014) のそれぞれを用いた場合のスペクトルのカラーの違いを調べた。作成したモデルキューサーを Subaru/Suprime-Cam で観測された COSMOS 領域の g', r', i', z' -band の画像に埋め込み、検出・測光し、二色図上での選出条件を満たす割合を計算することでコンプリートネスを求めた。

導出したコンプリートネスを用い、COSMOS 領域の $z \sim 4 - 5$ のキューサーサンプル (Ikeda et al. 2011, 2012) を基にキューサー光度関数を導出した。

3 Results

まず、キューサースペクトルの光度依存性がキューサーカラーに与える影響を調べた。 $EW_{\text{rest}}(\text{C IV})$ と α_ν の平均値を用いた各光度のモデルスペクトルについて、各赤方偏移におけるカラーの二色図上での振る舞いを比較すると、低光度キューサーのカラーは選出領域に入りやすいことが分かった (図 2)。

次に、IGM の吸収モデルの違いがキューサーカラーに与える影響について調べた。モデルスペクトルに旧来のモデル (Madau 1995) 又は最新の観測デー

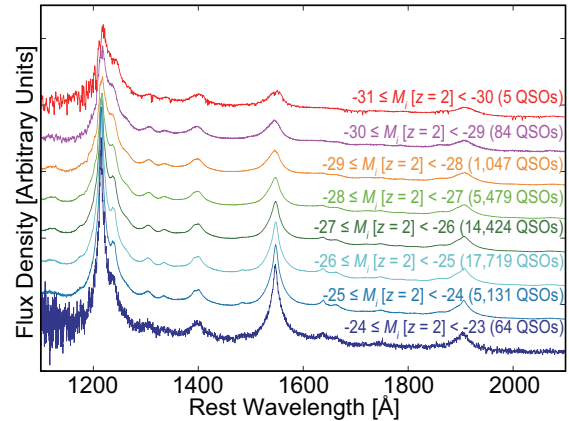


図 1: 光度ごとのコンポジットスペクトル。括弧内に各光度範囲におけるキューサーの個数を示した。

タに基づくモデル (Inoue et al. 2014) を適用した各場合について、各赤方偏移における二色図上でのカラーの振る舞いを比較した。その結果 Inoue et al. (2014) を適用したモデルキューサーのカラーは、選出領域のより外側に近づくことが分かった。

これらの結果からキューサーカラーはスペクトルの光度依存性と IGM モデルの影響を受けることが判明したので、この光度依存性を考慮し、Inoue et al. (2014) のモデルを用いてコンプリートネスを再評価した (図 3)。 $z \sim 4.1, 5.2$ でコンプリートネスが減少するのは C IV 輝線によって $r' - i'$, $i' - z'$ がそれぞれ赤くなることが原因である。また低光度キューサーほど選出領域に入りやすいというスペクトルの光度依存性の効果により、 $z > 5.2$ 等で実視等級が暗いキューサーのコンプリートネスがより明るいキューサーのコンプリートネスを上回っている。

導出したコンプリートネスを用いて、 $z \sim 4 - 5$ のキューサー個数密度を導出した (図 4, 5)。キューサーサンプルは COSMOS 領域で観測されたもの (Ikeda et al. 2011, 2012) を用いた。 $z \sim 4$ では SDSS で観測された高光度キューサーの個数密度 (Richards et al. 2006) と合わせてフィッティングすることにより光度関数を求めた。従来のコンプリートネスの導出方法で求められた Ikeda et al. (2011) の結果と比較すると、低光度キューサーの個数密度が約 24% 減少した。また、 $z \sim 5$ の低光度キューサーの個数密度の上限値を求めた結果、Ikeda et al. (2012) の結果に比べ

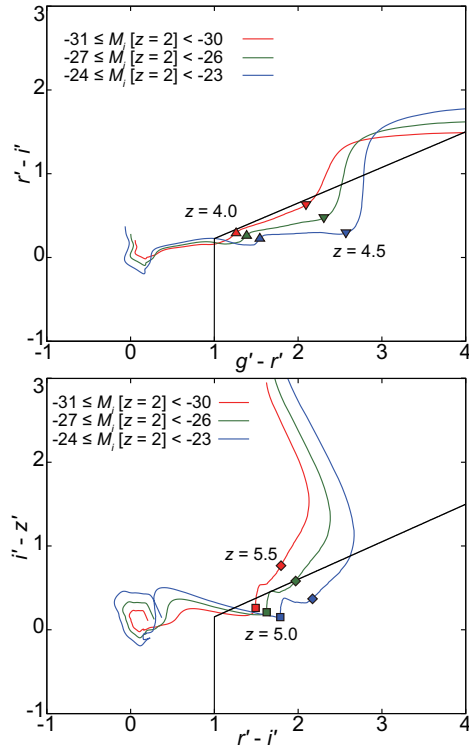


図 2: 二色図 ($g' - r'$ vs. $r' - i'$ (上), $r' - i'$ vs. $i' - z'$ (下)) 上における光度ごとの平均的なスペクトルの各赤方偏移でのカラーの振る舞い。観測された点源からクェーサーを星と区別するために、クェーサーとして選出する天体のカラーの条件として $z \sim 4, 5$ での選出領域を示した (Ikeda et al. 2011, 2012)。

て約 29% 増加した。これらの結果により高赤方偏移のクェーサー光度関数の低光度側の傾きは、クェーサースペクトルの光度依存性と IGM 吸収モデルの影響を受けて変化することが分かった。したがって本研究は、より正確なクェーサー光度関数を導出するためにはこれらの影響を考慮してコンプリートネスを導出する必要があることを示した。

4 Discussion

導出した $z \sim 4-5$ のクェーサー個数密度と先行研究で求められた各赤方偏移における個数密度のデータから、クェーサー個数密度の赤方偏移進化を光度ごとに調べた (図 6)。その結果、先行研究で求められた $z \sim 3$ の個数密度より我々の $z \sim 4$ の個数密度

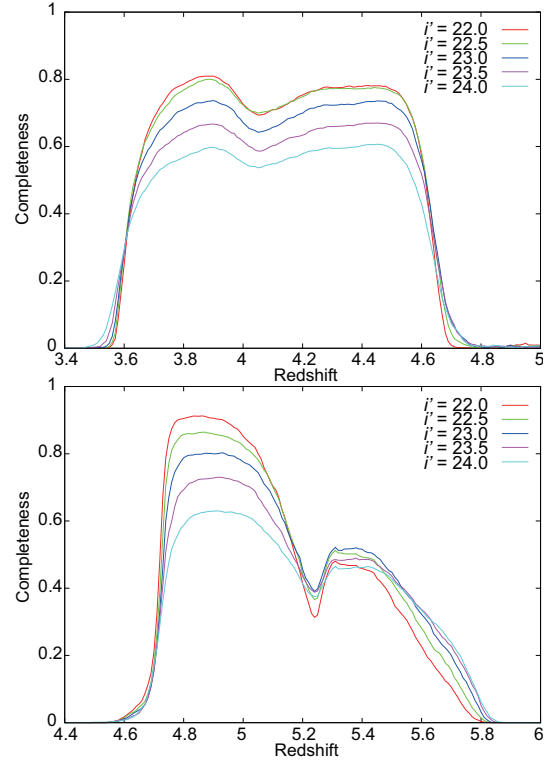


図 3: 実視等級ごとのコンプリートネス $z \sim 4$ (上), $z \sim 5$ (下)

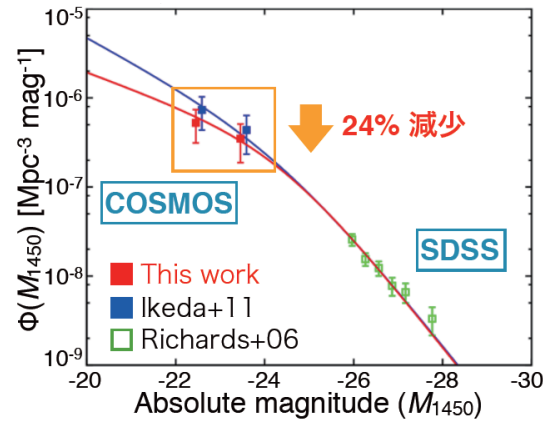


図 4: $z \sim 4$ クェーサー光度関数。赤と青の実線は本研究と Ikeda et al. (2011) の COSMOS の個数密度と SDSS の個数密度をフィットした結果。

は小さく、 $z \sim 5$ の個数密度の上限値はさらに小さいことが分かった。したがってコンプリートネスの導出方法の違いにより高赤方偏移の低光度クェーサー

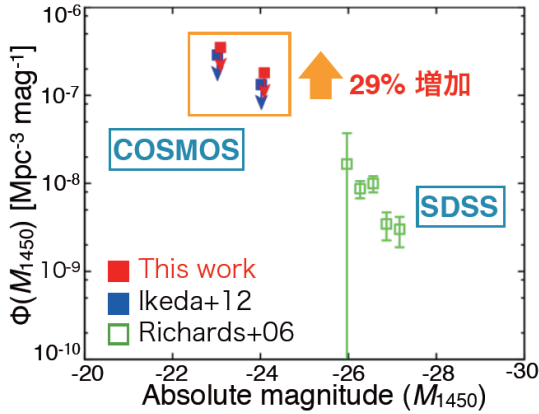


図 5: $z \sim 5$ クェーサー光度関数。赤と青は COSMOS のデータを用いた本研究と Ikeda et al. (2012) の個数密度の上限値。緑は SDSS のデータを用いた結果。

の個数密度は変化するが、AGN down-sizing シナリオに従うことが分かった。

今後より詳しく巨大ブラックホールの進化について調べるためには、高赤方偏移の低光度クェーサーサンプルを増やすことが必要である。これを可能にするのが広い視野と深さを兼ね備えた HSC である。HSC による大規模サーベイデータを用いることで、これまで観測不可能であった高赤方偏移の低光度クェーサーの大規模サンプルを得ることができ、さらにすばる望遠鏡の超広視野分光器 (Prime Focus Spectrograph; PFS) を用いることで、成長初期の巨大ブラックホールの統計的な性質の解明が期待される。

5 Conclusion

我々は高赤方偏移の低光度クェーサー光度関数をより正確に導出するために、従来のコンプリートネスの導出方法の改善を行った。従来のコンプリートネスに含まれる系統誤差の原因であるクェーサースペクトルの光度依存性を考慮し、最新の観測データに基づく IGM モデルを使用することで、より正確なコンプリートネスと光度関数の導出に成功した。その結果、従来の方法でコンプリートネスを求めた場合に比べ、個数密度は $z \sim 4$ で約 24% 減少し、 $z \sim 5$ で上限値が約 29% 増加した。コンプリートネスの導出方法の改善によりクェーサー個数密度は変化した

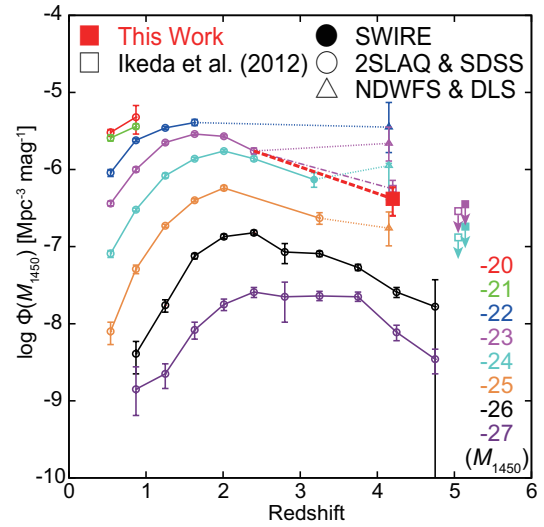


図 6: 絶対等級ごとのクェーサー個数密度の赤方偏移進化。本研究と Ikeda et al. (2012) は COSMOS のデータを使用。

が、従来の方法を用いた場合と同じく個数密度の赤方偏移進化は AGN down-sizing シナリオに従った。

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. 1977, ApJ, 214, 679
- Croom, S. M., Richards, G. T., Shanks, T., et al. 2009, MNRAS, 399, 1755
- Ikeda, H., Nagao, T., Matsuoka, K., et al. 2011, ApJ, 728, L25
- Ikeda, H., Nagao, T., Matsuoka, K., et al. 2012, ApJ, 756, 160
- Inoue, A. K., Shimizu, I., Iwata, I., & Tanaka, M. 2014, MNRAS, 442, 1805
- Madau, P. 1995, ApJ, 441, 18
- Pâris, I., Petitjean, P., Aubourg, É., et al. 2012, A&A, 548, 66
- Richards, G. T., Strauss, M. A., Fan, X., et al. 2006, AJ, 131, 2766