

X 線と可視光を用いた XMM-LSS 領域における クェーサー候補天体の選出

馬場崎 康敬 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

遠方に存在するクェーサーの探査は、超大質量ブラックホールの進化を理解する上で重要な観測的アプローチとなっている。クェーサー探査によく使われる方法として、光学望遠鏡で得られた等級を用いて候補天体を選出する色選択と呼ばれる方法がある。しかし、この方法で選出した天体には、Ly α 輝線の強い銀河や星などのコンタミネーションが多い。そこで、本研究では色選択の際に、AGN 探査に有効な X 線の情報も用いて、X 線天文衛星 XMM-Newton と光学望遠鏡 Canada-France-Hawaii Telescope による観測が行われている XMM-LSS 領域からクェーサーの可能性がより高い天体の選出を試みた。X 線スペクトル解析を行うために 0.5-10 keV のカウントが 60 以上であるという条件を課し、CFHT の g 、 r 、 i 、 z バンドの等級を利用し、 $z \sim 4$ と $z \sim 5$ のクェーサー候補天体をそれぞれ 17 個、12 個を選出した。選出した天体と既知のクェーサーを (1) X 線スペクトルをべき関数で表したときのべき (光子指数) の値、(2) 天体の X 線光度、(3) クェーサーに知られる U_V / X 線の光度比と U_V 光度の間にある相関関係、という観点から比較した所、 $z \sim 4$ と $z \sim 5$ のクェーサー候補天体で、それぞれ 16 個、12 個が既知のクェーサーの性質と合致した。これにより、X 線天体を伴う可視光天体からクェーサー候補天体の選出を行うことはクェーサー探査に対して有効であることが分かった。

1 Introduction

宇宙には、活動銀河核 (AGN; Active Galactic Nucleus) と呼ばれる電波から X 線までの広い波長域で強く輝く中心領域をもつ銀河がある。AGN 中心には超大質量ブラックホール (SMBH; Supermassive Black Hole) が存在していると考えられており、SMBH の形成過程の理解は、現代宇宙物理学の重要課題のひとつとなっている。AGN の中でも光度が $10^{45} \text{erg s}^{-1}$ 以上のものは特にクェーサーと呼ばれ、遠方に存在することが知られている。非常に遠方 (過去) にあるクェーサーの探査は、SMBH の形成過程を解明する上で重要である。現在、光学赤外線望遠鏡「すばる望遠鏡」の可視広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた 2000 平方度にあたる大規模撮像探査が計画されており、クェーサーの大規模サンプルが得られることが期待される。

よく使われる遠方クェーサー選出法は、可視光の等級を用いた色選択である。これは、Ly α 輝線より短波長側が視線上的中性水素ガスによって吸収され

たクェーサーのスペクトル (図 1) が赤方偏移することで生じる色の変化を利用した方法である。しかし、この方法で選出したサンプルには、クェーサー以外の天体が含まれることが分かっている。そこで、本研究では AGN 探査に有効な X 線を用いて、X 線天体を伴う可視光天体の中から候補天体を色選択し、選出した天体がクェーサーの性質を満たすかどうか調べた。

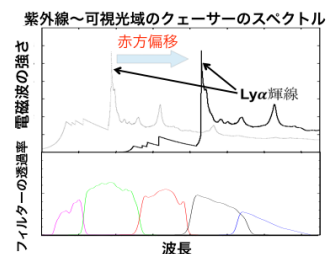


図 1: 紫外線～可視光域のクェーサーのスペクトルと望遠鏡のフィルターレスポンス。上のパネルは赤方偏移前後のクェーサースペクトルを表し、下のパネルはそれぞれの色の線が望遠鏡の異なるフィルターのレスポンスを表す。

2 Selection

クェーサー候補天体選出の対象とした領域は、HSC の探査領域と重なっている XMM-LSS 領域である。本研究ではこの中で、赤方偏移 z が $z \sim 4$ または $z \sim 5$ の遠方クェーサーの選出を行った。使用した天体カタログは、XMM-LSS カタログ (Pierre et al. 2007) であり、この中には XMM-LSS 領域の約 3 平方度において X 線天文衛星 XMM-Newton が観測した天体とそれぞれの X 線天体を中心に 6 秒角以内において、光学望遠鏡 Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) により観測された天体のデータが含まれている。

色によって天体を選出する際には、2 色図と呼ばれる 2 つの色を縦軸と横軸にとった図がよく用いられる。2 色図上にクェーサーのモデルスペクトルから予測される赤方偏移に伴う変化 (モデルトラック) を描き込み、これを指標にしてクェーサー候補天体を選出するのである。本研究では、Ikeda et al. (2011),(2012) と同様に、Madau et al.(1995) の中性水素ガスの吸収、Vanden Berk et al.(2001) の composite spectra を用いてモデルトラックを作成した (図 2 の赤線)。CFHT で取得された g 、 r 、 i の 3 バンド¹の等級から $g-r$ vs. $r-i$ の 2 色図 (図 2 左パネル) を用いて、X 線スペクトル解析に必要なカウント (0.5-10 keV で 60 カウント以上) を持った $z \sim 4$ クェーサー候補天体 17 個を選出した。2 色図上の候補天体選出領域は星の系列がある領域 (天体が密集した領域) を避け、モデルトラックに沿うように決めた。 $z \sim 5$ クェーサー候補天体に関しても、 r 、 i 、 z の 3 バンド¹の等級から、同様にして $z \sim 5$ クェーサー候補天体 12 個を選出した (図 2 右パネル)。

3 Analysis/Results

クェーサーには光度が 10^{45} erg s⁻¹ 以上、さらに、その X 線スペクトルをべき関数 $E^{-\Gamma}$ で表したときの Γ (光子指数) がおよそ 1.5-2.5、という性質がある。また、クェーサーには rest frame での Uv と X 線の光度比である α_{ox} ($\equiv -0.3838 \log [L_{2500\text{\AA}}/L_{2\text{keV}}]$)

¹ g 、 r 、 i 、 z バンドの有効波長はそれぞれ、4863 Å、6258 Å、7553 Å、8871 Å である。

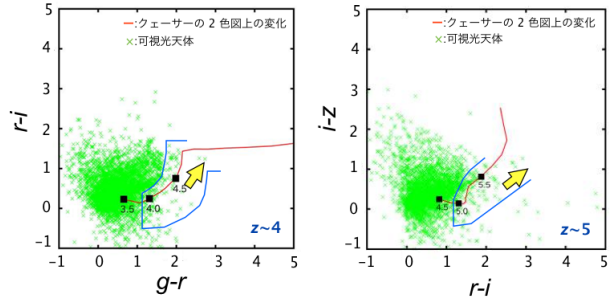


図 2: 2 色図にプロットした XMM-LSS カタログの可視光天体。(左)、(右) パネルのそれぞれ青い線より右側が $z \sim 4$ 、 $z \sim 5$ のクェーサー候補天体の選出領域。

と $L_{2500\text{\AA}}$ の間に強い相関があることが知られている (e.g. Steffen et al. 2006, Green et al. 2008)。そこで、選出した天体とこれまでに知られているクェーサーを以下の 3 つの観点から比較する。

1. 光子指数
2. 光度
3. α_{ox} と $L_{2500\text{\AA}}$ の相関

この 3 つの観点から見たときにクェーサーの性質と 1 つでも矛盾した天体はクェーサー以外の天体であると判断する。

1, 光子指数

選出した天体の光子指数を調べるために、X 線スペクトル解析を行った。解析につかたデータは、XMM-Newton Science Archive; XSA より取得した。フィッティングに使ったモデルは吸収を受けたべき関数である。X 線スペクトル解析の結果、ほぼすべて天体の光子指数が典型的なクェーサーの光子指数と誤差の範囲で一致していた。しかし、XLSS J022713.6-043909 だけは $9.5_{-3.0}$ という非常に大きな光子指数を示していた。この天体はクェーサーではないと考えられる。図 3 に解析した天体のスペクトルの例を示し、表 1 にフィッティング結果の例を示す。

2, X 線光度

AGN の全放射エネルギーに対する 2-10 keV のエネルギー帯域における放射の割合は約 10 % であるといわれている (e.g. Elvis et al. 1994)。クェーサーの光度は 10^{45} erg s $^{-1}$ 以上であるため、2-10 keV の光度はおおよそ 10^{44} erg s $^{-1}$ 以上となる。 $z \sim 4$ 、 $z \sim 5$ クェーサーの色を示した天体の赤方偏移をそれぞれ $z = 4$ 、 $z = 5$ と仮定したときの 2-10 keV の光度をスペクトル解析から調べるとすべて 10^{44} erg s $^{-1}$ 以上であった。したがって、選出した天体の光度はクェーサーと矛盾しないことが分かった。選出した天体の光度の例を表 1 に示す。

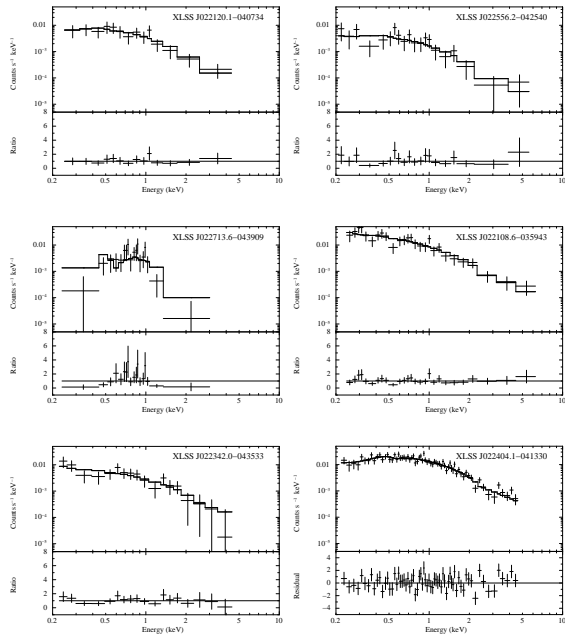


図 3: 選出した天体のスペクトルの例

表 1: 選出した天体のフィッティング結果の例

source name	Γ^a	$\log(L_{2-10\text{keV}})^b$	Remark
XLSS J022120.1-040734	$2.45^{+1.11}_{-0.69}$	45.61	$z \sim 4$
XLSS J022556.2-042540	$2.48^{+1.84}_{-0.69}$	45.29	$z \sim 4$
XLSS J022713.6-043909	$9.50^{+0.00}_{-3.00}$	45.29	$z \sim 4$
XLSS J022108.6-035943	$2.08^{+0.31}_{-0.22}$	46.23	$z \sim 5$
XLSS J022342.0-043533	$1.88^{+0.36}_{-0.33}$	44.52	$z \sim 5$
XLSS J022404.1-041330	$2.28^{+0.23}_{-0.20}$	45.84	$z \sim 5$

^a 誤差は 1 パラメータに対する 90 % 信頼区間である。
^b $z \sim 4$ は、 $z = 4$ 、 $z \sim 5$ は、 $z = 5$ を仮定したときの 2-10 keV 光度の対数 (erg s $^{-1}$)

3, α_{ox} と $L_{2500\text{\AA}}$ の相関

選出した天体が、Steffen et al. (2006) で得られた α_{ox} と $L_{2500\text{\AA}}$ の相関から外れていないかどうかを確認する。Steffen et al. (2006) の結果を図 4 に示す。Steffen et al. (2006) は明るい 333 個の Broad line AGN サンプルから図 4 の結果を得ており、この結果はよく AGN を研究した論文で用いられる。ここではクェーサーの取りこぼしを防ぐために、Steffen et al. (2006) の結果から 3σ 以内に入る天体はクェーサーの性質と矛盾しないと考える。 $z \sim 4$ 、 $z \sim 5$ クェーサーの色を示す天体を、それぞれ赤方偏移 $z = 4$ 、 $z = 5$ と仮定して求めた α_{ox} と $L_{2500\text{\AA}}$ を用いて、図 4 にプロットした。 α_{ox} を求める際に必要な $L_{2500\text{\AA}}$ と $L_{2\text{keV}}$ は、XMM-LSS カタログの測光データを減光補正して、K 補正することで求めた。図 4 を見ると $z \sim 4$ 、 $z \sim 5$ クェーサーの色を示す天体はそれぞれ、17/17 個、12/12 個が 3σ 以内に入り、これらがクェーサーの性質を満たしていることが分かった。

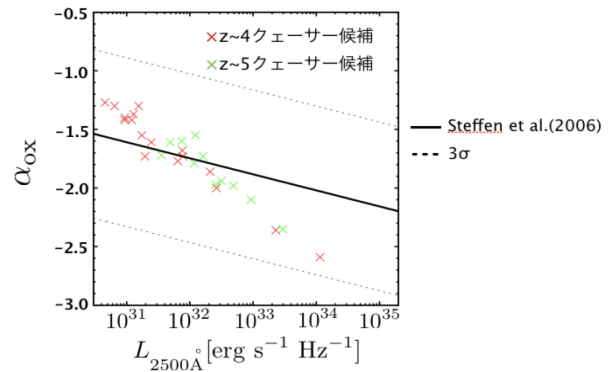


図 4: α_{ox} と $L_{2500\text{\AA}}$ の関係図。赤い \times は $z \sim 4$ クェーサーの色を示す天体。緑の \times は $z \sim 5$ クェーサーの色を示す天体である。図中の黒い実線は Steffen et al.(2006) で得られた結果である。点線は黒い実線から 3σ 離れていることを表す。

以上より 3 つの観点から見たときにクェーサーの性質と合致する天体を選ぶと、 $z \sim 4$ クェーサーの色を示す天体は 16/17 個、 $z \sim 5$ クェーサーの色を示す天体は 12/12 個であった。尚、クェーサーの性質と合致しなかった XLSS J022713.6-043909 は、Stalin

et al.(2010) によると M 型のスペクトルをもった晩期型星であった。XLSS J022713.6-043909 が含まれていたのは、M 型のスペクトルにみられる 5000 \AA 付近の長波長側から短波長側にかけての急激な落ち込みが原因であると考えられる。このようなコンタミネーションは、可視光だけでは除くことができず、X 線を用いることで初めて除くことができる。

4 Conclusion

選出した天体とこれまでに知られているクェーサーを (1) X 線スペクトルをべき関数で表したときのべき (光子指数) の値、(2) 天体の光度、(3) U_V / X 線の光度比と U_V 光度の間にある相関関係、という 3 つの観点から比較した。その結果、 $z \sim 4$ の候補天体の中の 1 個だけを除き、 $z \sim 4$ のクェーサー候補天体 16 個、 $z \sim 5$ のクェーサー候補天体 12 個がクェーサーの性質と合致した。これから、可視光に加え X 線を用いて、X 線天体を伴う可視光天体の中からクェーサー候補天体を選出することはクェーサー探査に有効であることが分かった。

Reference

- [1] Elvis, M., et al. 1994, ApJS, 95, 1
- [2] Green, P.J., et al. 2008, ApJ, in press (arXiv:0809.1058v1)
- [3] Ikeda, H., et al. 2011, ApJ, 728, L25
- [4] Ikeda, H., et al. 2012, ApJ, 756, 160
- [5] Madau, P. 1995, ApJ, 441, 18
- [6] McGreer, I.D., et al. 2012, ApJ, in press (arXiv:1212.4493)
- [7] Pierre, M., et al. 2007, MNRAS, 382, 279
- [8] Stalin, C.S., Patrick Petitjean, Srianand, R., Srianand, R., Fox, A.J., Coppolani, F. 2010, MNRAS, 401, 294
- [9] Steffen, A.T., Strateva, I., Bradt, W.N., et al. 2006, AJ, 131, 2826
- [10] Vanden Berk, D.E. et al. 2001, AJ, 122, 549
- [11] Wide-field imaging with Hyper Suprime-Cam: Cosmology and Galaxy Evolution