

SMBH と母銀河の共進化史解明に向けた小質量サンプルの獲得

木村 勇貴 (東北大学 天文学専攻 M2)

Abstract

銀河と超大質量ブラックホール (Super Massive Black Hole; SMBH) の共進化史を解明するにあたって、高赤方偏移での銀河と SMBH の関係を知ることが非常に重要である。従来は X 線で同定された比較的に明るい天体、つまり大質量サンプルだけを用いて議論されるだけで、小質量サンプルについてはあまり扱われることはなかった。そこで我々のグループでは、AGN の「変光」の性質と「color-selection」を組み合わせ、高赤方偏移にある小質量 SMBH サンプル獲得に向けた調査を SXDS 領域で行った。その結果、測光赤方偏移が 1 以上で、SMBH 質量が $10^8 M_\odot$ 以下の候補天体が 665 天体も存在することがわかった。またこれらの一部に対して分光観測を実施した結果、SMBH 質量が $10^8 M_\odot$ 以下である可能性が非常に高いことが明らかとなった。これらの結果から X 線でも受からないような高赤方偏移の小質量 AGN 天体を探す際には、「変光」と「color-selection」を組み合わせる方法が非常に有効であると言える。

1 Introduction

銀河のスフェロイド成分の物理的性質 (星質量や速度分散など) と超大質量ブラックホール (Super Massive Black Hole; 以下 SMBH) の質量との間に非常に良い相関を持っていることから、銀河と SMBH は共進化しているのではないかとされるようになった (Kormendy & Ho. 2013, Graham. 2015)。銀河と SMBH がどっちが先に成長したのか、またどのような物理過程によってそのような関係を持つに至ったのかなど、現在までに様々な議論がなされているが (Volonteri. 2012, King & Pounds. 2015)、未だに解明されるに至っていない。これらを解明するにあたって重要な情報は過去の状態を知ることである。つまり高赤方偏移での銀河と SMBH の関係の歴史を調べることは、そこで起きている物理過程を知る最も直接的な方法である。

観測的に銀河と SMBH 共進化史に関する研究は近年活発に行われている (例えば Sun et al. 2015, Park et al. 2015)。活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; 以下 AGN) を持つ天体は SMBH に物質が降着することで明るく輝くとされる天体であり、遠方宇宙で SMBH 質量を測定できる唯一の天体である。つまり AGN と同定された天体に対して分光観測を実施することによって正確に SMBH 質量を見積もることがで

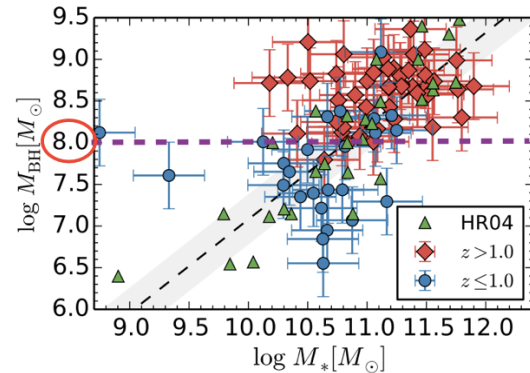


図 1: Sun et al. 2015 の観測結果。HR04 は近傍の観測結果である。 $z > 1$ で $10^8 M_\odot$ 以下のサンプルがほとんどないことがわかる。

きる。AGN と同定するには X 線で検出された天体を分光するしかなく、Sun et al. 2015 ではそのような X 線で検出された AGN に対してのみ分光観測を行うことによって母銀河との関係を調べるに至っている (図 1)。しかし X 線で検出されるには非常に明るい、つまり SMBH が大質量な天体しか検出されず、実際に図 1 では赤方偏移が 1 以上ではほとんどが $10^8 M_\odot$ 以上の SMBH 質量のサンプルだけを用いた議論しかされていない。小質量サンプルは X 線での検出が厳しかったため分光サンプルとして候補に挙がることがほとんどないといった状況である。しかし

ながら、近傍の SMBH 質量と母銀河の性質の関係を遠方のものと比較する上で、成熟しきった大質量サンプルだけでなく小質量サンプルも含めた議論は必要不可欠であり、また銀河進化を考える上でも高赤方偏移における小質量サンプルは非常に重要な立ち位置にあることが考えられる。つまり高赤方偏移での小質量サンプルの獲得は共進化を議論する上で避けて通れることはできない。

そこで我々のグループは、このような高赤方偏移（ここでは $z > 1$ の天体を指す）で小質量（ここでは $10^8 M_\odot$ 以下とする）の SMBH を持つ AGN を探すことにした。ここでの小質量 SMBH は X 線でも検出できないような AGN を想定している。方法については次章で述べる。

2 Methods

目標は X 線でも検出できないような高赤方偏移 ($z > 1$) にある小質量 ($10^8 M_\odot$ 以下) の SMBH を持つ AGN を数多く発見することである。そのために AGN の変光の性質を用いる。

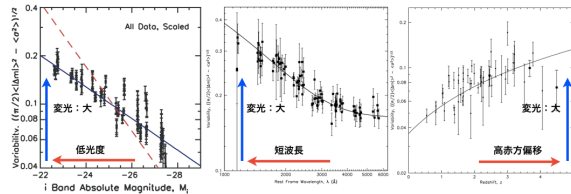


図 2: 変光強度に対する絶対等級 (左)、静止波長 (真ん中)、赤方偏移 (右) の関係。低光度、短波長、高赤方偏移ほど変光の割合が高い (Vanden Berk et al. 2004)。

Vanden Berk et al. 2004 によると、低光度で短波長 (さらに高赤方偏移) ほど変光の性質が強く表れることが示されている (図 2)。これにより、より変光が強い天体ほど小質量 AGN の獲得が期待される。これに加えて color-selection によって BzK (Daddi et al. 2004) や DRG (Franx et al. 2003)、LBG (Steidel et al. 1996) といった高赤方偏移サンプルの確保が期

待される¹。

この「変光」の性質と「color-selection」を組み合わせ、X 線でも検出できないような高赤方偏移・小質量サンプル獲得に向けた調査を SXDS 領域で行った。BVRIZ'-band (Furusawa et al. 2008), JHK-band (Warren et al. 2007), 3.6, 4.8, 5.8, 8.0 μm (Lonsdale et al. 2003) の測光データを用いて color-selection を行う。また Subaru Suprime-Cam の z'-band を用いて複数の日程で撮られたデータ (Miyazaki et al. 2002) を用いて変光の調査を行った (表 1)。また星質量や赤方偏移などの情報は測光データから SED Fitting によって計算することにする。

表 1: Summary of the multi-epoch DATA

Date	UDS1	UDS2 5 σ / FWHM mag. / "	UDS3	UDS4
2008/11/4	24.4/1.01	24.8/1.03	—	—
2008/11/27	25.4/1.07	26.2/1.05	26.0/1.03	26.1/1.05
-12/4				
2008/12/25	—	25.4/1.05	—	—
2009/01/29	—	24.7/1.05	—	—
2009/10/13	25.5/1.09	25.7/1.09	25.6/1.05	25.1/1.07
2009/11/14	—	—	—	25.2/1.05
2009/11/22-23	25.5/1.03	25.9/1.05	—	26.2/1.07
2010/02/13-16	25.6/1.05	—	25.2/1.05	—
2011/01/6-7	25.8/1.09	—	26.0/1.05	—

3 Results

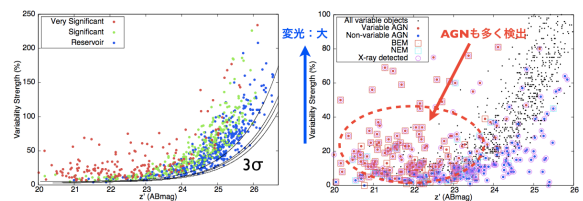


図 3: z'-band の等級 (ABmag) vs 変光強度。赤点は 1 回でも 5 σ 以上の変光があったもの。緑点は 1 回で 4 σ 以上、もしくは 2 回 3 σ 以上の変光があったもの。青点は 1 回で 3 σ 以上の変光があったものである。

¹BzK については、 $BzK \equiv (z - K)_{AB} - (B - z)_{AB}$ としたときに sBzK: $BzK > -0.2$, pBzK: $BzK < -0.2, z - K > 2.5$ を満たす天体で、 $1.4 < z < 2.5$ の天体を選択することができる。DRG については $(J - K)_{vega} > 2.3$ によって $2 < z < 4$ の天体を選択できる。

図 3 では変光の強度を等級を横軸として表したものである。図 3 右では変光天体の中で AGN の性質 (X 線検出や Broad Line) を示すものも共にマークされている。以上から変光天体として AGN を優位に選択できていることがわかる。今回の調査結果については以下の表 2 にまとめる。ここで SMBH 質量は SED Fitting によって得られた母銀河の星質量に対して 0.1% の質量をもつ (近傍の観測事実) と仮定して計算している。

表 2: 変光の調査結果
(星質量の 0.1% が SMBH 質量と仮定) **小質量** ←

赤方偏移	SMBH 質量	$\sim 10^6 M_\odot$	$10^6 \sim 10^7 M_\odot$	$10^7 \sim 10^8 M_\odot$	$10^8 M_\odot \sim$	合計
$z < 1.0$		164	19	10	1	194
$1.0 < z < 2.0$		38	247	192	45	522
$2.0 < z < 3.0$		2	59	106	29	196
$3.0 < z$		1	4	16	5	26
合計		205	329	324	80	938

高赤方偏移 ↓

X 線で検出されている天体 (AGN) は 66 天体

全部で 665 個の高赤方偏移 ($z > 1$) で小質量 ($10^8 M_\odot$ 以下) SMBH の候補天体を得られた。大質量のもの ($10^8 M_\odot$ 以上) よりも小質量のものが多く検出できているのは、低光度のものほど変光強度が大きいという Vanden Berk et al. 2004 の結果と一致している。このように、変光の性質を用いてやることで数多くの小質量 SMBH をもつ AGN 候補天体をうまく抽出することができる。これらが本当に AGN 天体で小質量な SMBH 質量をもつかどうかを正確に決めてやるには今後分光観測が必要となる。これについては次章で少し述べる。

4 Discussion

上の結果で得られた天体が本当に AGN 天体で小質量 SMBH を持っているかを検証する必要がある。一般的に SMBH 質量を正確に求めるには分光観測を行い Broad Line の検出が必要不可欠となる。そこで上記で獲得された候補天体の一部に対して分光観測を行った (Keck 望遠鏡 DEIMOS)。一部の天体は低光度のため暗すぎて輝線・連続光を検出することができておらず、また測光赤方偏移の不定性により Broad Line の検出ができなかったものがあつたが、5 天体については図 3 のように MgII の Broad Line

を検出することができた。

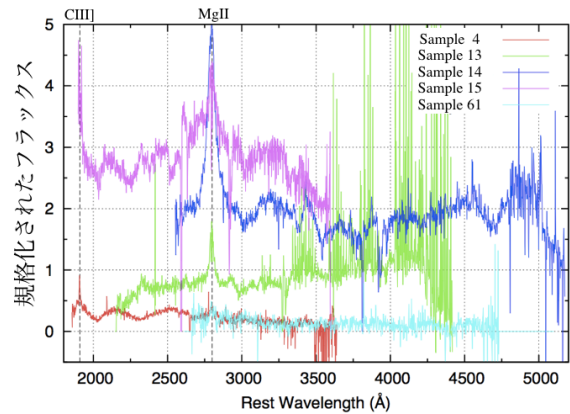


図 4: 分光結果

まだ解析途中のため、SMBH 質量の正確な計算は行えていないが、ここでは大雑把にその値について見積もってみることにする。1 回の分光観測 (single epoch) で SMBH 質量を測定するためには、 $H\beta(4861\text{\AA})$, $MgII(2798\text{\AA})$, $CIV(1548\text{\AA})$ といった Broad Line が必要であり、以下の式を用いて計算することができる。

$$\log \left(\frac{M_{BH}}{M_\odot} \right) = A + B \log \left(\frac{\lambda L_\lambda}{10^{44} \text{ erg/s}} \right) + 2 \log \left(\frac{v_{FWHM}}{10^3 \text{ km/s}} \right) \quad (1)$$

MgII の場合、 $\lambda = 3000\text{\AA}$, $A = 6.86$, $B = 0.47$ である (Vestergaard & Peterson, 2006)。ここでまず光度については、静止波長で $3000\text{\AA}$ 付近にあるバンドでの測光で得られたフラックスの値 (観測されたフラックスが全て AGN による寄与として考える) から計算することにする。また v_{FWHM} は、 3000 km/s の場合と大きく見積もって 4500 km/s の場合とで計算することにする。その結果は得られた SMBH 質量の結果は表 3 の通りである。

大雑把に計算した結果に対して、SMBH 質量は全て $10^8 M_\odot$ 以下の小質量 (ただし $v_{FWHM} = 3000\text{ km/s}$ とした場合) であるという結果が得られた。この結果は母銀河の成分を含めたフラックスで考えているため overestimate した結果であり、これよりもさら

表 3: 計算結果

Sample No	Red- shift	F_{λ} erg/s/cm ² /Å	$M_{BH}(M_{\odot})$ 3000km/s	$M_{BH}(M_{\odot})$ 4500 km/s
4	1.667	1.75×10^{-18}	6.4×10^7	1.4×10^8
13	1.304	1.64×10^{-18}	4.7×10^7	1.1×10^8
14	0.940	7.30×10^{-18}	6.5×10^7	1.5×10^8
15	1.617	4.73×10^{-18}	9.9×10^7	2.2×10^8
61	0.896	4.08×10^{-19}	1.6×10^7	3.5×10^7

に小さい SMBH を持つ可能性がある。よって今回の変光で選り出された AGN の SMBH 質量は確かに小質量であることが実証された。

5 Conclusion

本研究では、AGN の「変光」の性質と「color-selection」に着目して高赤方偏移 ($z > 1$) にある小質量 ($10^8 M_{\odot}$ 以下) SMBH を持つ候補天体の調査について行った。その結果、SXDS 領域で 665 天体もの候補天体を見つけることが出来た。これらの一部に対して分光観測を実施してやったところ、5 つの天体は $10^8 M_{\odot}$ 以下の SMBH 質量であることが判明した。この結果により、「変光」と「color-selection」を用いて高赤方偏移にある小質量 SMBH を獲得するには非常に有効であることがわかった。今後としては、分光で得られたスペクトルから SMBH 質量を厳密に計算していき小質量であるかどうかの実証を正確に行うとともに、さらに追加で分光観測を実施してサンプルを増やすことで小質量サンプルを含めた共進化史について調査していく予定である。またこの手法の確立によって、HSC や PFS といった次世代の広視野のサーベイにも拡張していきたいと考えている。

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、光学赤外線天文連絡会からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Daddi et al. 2004, ApJ, 617, 746D
 Franx et al. 2003, ApJ, 587L, 79F
 Furusawa et al. 2009, yCat, 21760001F
 Graham. 2015, arXiv150102937G
 King & Pounds. 2015, arXiv150305206K
 Kormendy & Ho. 2013 ARA&A, 51, 511K
 Lonsdale et al. 2003, PASP, 115, 897L
 Miyazaki et al. 2002, PASJ, 54, 833
 Park et al. 2015, ApJ, 799, 164P
 Steidel et al. 1996, ApJ, 462L, 17S
 Sun et al. 2015, ApJ, 802, 14S
 Vanden Berk et al. 2004, ApJ, 601, 692V
 Vestergaard & Peterson. 2006, ApJ, 641, 689V
 Volonteri. 2012, Sci, 337, 544V
 Warren et al. 2007, MNRAS, 375, 213W