

AGN feedback to galaxy formation at high redshift

菊田 智史 (総合研究大学院大学 天文科学専攻 / 国立天文台)

Abstract

活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) がその母銀河へ与える影響 (feedback) は多く研究されているが、AGN が周囲の別の銀河に与える feedback、特に光度の大きな AGN (=Quasistellar Objects; QSO) が周囲の低質量の銀河に与える feedback は、存在するはずと定性的には言われているものの、定量的には観測的にも理論的にも理解は十分進んでいない。そこで我々は、すばる望遠鏡の広視野可視光線カメラ Suprime-Cam ($34' \times 27'$ FoV) を用いて、 $z = 4.87$ 付近の明るい 2 つの QSO の周囲 (SDSS J080715.12+132804.8, SDSS J111358.32+025333.6) を、狭帯域フィルター NB711 および広帯域フィルター (R, i') で広くかつ低質量の銀河 (ここでは $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河、LAE) を観測できる深さまで撮像観測し、低質量銀河への feedback 効果を定量的に調べることを試みた。観測した QSO の z は MgII 輝線の近赤外分光観測から $z = 4.88, 4.87$ と精度よく ($\Delta z \ll 0.01$) 求まっており、NB711 ($z = 4.83\text{--}4.89$ の $\text{Ly}\alpha$ をカバー) で QSO と同じ z の LAE を確実に捉えることができる。また、広視野観測により QSO の影響のある部分とない部分を同時に 1 視野内に捉えて比較することが可能となる。達成された深さは NB711 $< 26\text{mag}$, R $< 27\text{mag}$, i' $< 26\text{mag}$ (すべて AB 等級) であり、 $z \sim 5$ の LAE 光度関数が折れ曲がる光度より十分暗い側まで達している。2 つのフィールドで選択されたそれぞれ 70 個、186 個の LAE を、QSO の影響の強い近傍領域と影響のない一般領域に分け別々に光度関数を描き、暗い側での傾きを比較した結果、feedback がある場合に期待される傾きの flattening はクリアには見られなかった。これらの結果から high- z における QSO と銀河の形成に関して考えられることを議論する。

1 Introduction

近年の観測により、銀河の spheroidal 成分の中心にほぼ普遍的に超巨大ブラックホール (Supermassive Black Holes; SMBH) が存在し、両者の性質に相関があることが明らかになった。このことは、銀河形成活動と SMBH への質量降着によって引き起こされる活動銀河中心核 (Active Galactic Nuclei; AGN) 活動が互いに関わりあいながら進化してきたこと、および AGN 活動が銀河形成において重要な役割を果たしてきたことを示唆している。AGN が銀河形成に及ぼす影響は AGN feedback と呼ばれ、主に母銀河の星間物質の物理状態を追跡することで研究されてきた。理論的には、シミュレーションによって銀河衝突により SMBH に大量のガスが送り込まれ AGN 活動が引き起こされること、及びそれにより周囲のガスが加熱されること、アウトフローが作られることなどが分かっている。宇宙論的シミュレーションにおいては、光度関数の明るい側や巨大楕円銀河の性

質などを観測と合わせるためには AGN feedback などの機構が不可欠であることが指摘されている (Di Matteo et al. 2005 etc.)。観測的には AGN 活動と母銀河での星形成率の関係や、アウトフロー速度と SFR の関係を見る研究 (Balmaverde et al. 2015) などがある。

一方、AGN により放出されるエネルギーは莫大であり、強い紫外光によって星形成を抑制することができるため、母銀河のみならず周囲の銀河にも影響を与えるはずである。しかし、AGN feedback による周囲の銀河への影響を定量的に明らかにできた研究は理論的にも観測的にも未だにほとんど成されていないのが現状である。これを探る方法として、非常に明るい AGN であるクエーサー (Quasistellar Object; QSO) の周囲にある低質量銀河の性質を、近くに QSO などの輻射源がない低質量銀河の性質と比べることが考えられる。ガス雲が強い UV 光に晒された場合、主に heating により収縮が妨げられるた

め SF は抑制される。Kashikawa et al.(2007) の議論では、球対称輻射流体計算により、あるピリアル質量を持つガス塊がある強度の背景輻射場に置かれたとき、そこでの星形成が (輻射場がない場合と比べて) どの程度遅れるかが計算されているが、その結果は軽いほど、輻射場が強いほど影響を強く受けるという予想と整合的であった。

観測的には QSO 周辺のライマンブレイク銀河 (Lyman Break Galaxies; LBG) の性質を調べた研究がいくつか存在する (Utsumi et al. 2010, Capak et al. 2011) が、天球面上で近くても視線方向の距離が大きく離れている LBG を排除できないため、QSO からの距離の見積もりに大きな不定性が残ってしまうという問題がある。また、LBG は連続光成分がある程度明るい種族であるため質量の大きい銀河を選択しやすく、AGN feedback を検出する目的には最適とは言えない。一方、狭帯域フィルターを用いて視線方向に狭い範囲の z にある銀河からの $\text{Ly}\alpha$ 輝線を捉えることにより見つかる $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (Lyman Alpha Emitters; LAE) は、星質量が $10^7\text{--}10^9 M_\odot$ 程度の軽い種族と考えられており (Finkelstein et al. 2007, Gawiser et al. 2006)、QSO の輻射による feedback 効果を検証するには最適の天体である。この観測をすばる望遠鏡の広視野可視光線カメラ Suprime-Cam で行うことで、QSO による輻射場が十分強く、proximity effect が見られる proximity 領域 ($< \text{physical } 3 \text{ Mpc}$, Bechtold 1994) と、その外側の QSO の影響がない領域を同時に観測できる。Suprime-Cam に搭載されている狭帯域フィルター NB711 は狭い帯域幅 ($\text{FWHM}=72\text{\AA}$) を持ち、 $z = 4.86$ 付近の視線方向で前後 2.9Mpc の範囲内の LAE を選択することができるため、前後方向に関しても proximity 内の LAE だけを拾うことが可能である。

Kashikawa et al.(2007) では $z \sim 5$ の QSO 周辺をこの狭帯域フィルターを含めて Suprime-Cam で撮像観測し、QSO の周囲で LAE は LBG と異なり QSO の周囲を避けて分布していることが示唆された。QSO による強い輻射が原因の一つとして議論されているが、QSO の z に不定性が残っていたため、輻射の影響を正確に議論することはできていない。そこで我々は今回、輻射による AGN feedback の影響を定量的に見積もる目的で、 z が Mg II 輝線の近赤外分光

表 1: 各画像におけるシーイング、 5σ 限界等級、合計積分時間。

J08	R band	i' band	NB711
seeing [arcsec]	0.87	0.92	0.69
5σ mag [mag]	26.66	26.17	25.93
exposure time [sec]	3300	1500	9000

J11	R band	i' band	NB711
seeing [arcsec]	0.67	0.65	0.64
5σ mag [mag]	27.05	26.85	25.06
exposure time [sec]	3300	3900	9900

により高い精度で ($\Delta z \ll 0.01$) 決定されている 2 つの QSO、SDSS J080715.12+132804.8 ($z = 4.88$, J08 for short)、SDSS J111358.32+025333.6 ($z = 4.87$, J11 for short) (Trakhtenbrot et al. 2011) を選び、その周囲をすばる望遠鏡の Suprime-Cam で撮像観測を行った。

2 Observation

上述の通り、Suprime-Cam ($34' \times 27'$ FoV) を用いて z が精密に求められている 2 つの QSO を中心とした 2 領域 (中心座標 J08: $08^{\text{h}}07^{\text{m}}15^{\text{s}}.0$, $+13^{\circ}28'05''.0$ J11: $11^{\text{h}}13^{\text{m}}58^{\text{s}}.0$, $+02^{\circ}53'33''.0$) を、2014 年 12 月 20 日から同月 25 日にかけて観測し、R、i'、NB711 の 3 バンドでの画像を取得した。NB711 は中心波長 $\lambda_c = 7126 \text{\AA}$ 、FWHM が $73 \text{\AA}$ の狭帯域フィルターである。最終的な画像の作成にはシーイングが $1''$ を切るもののみを用いた。解析に使用した画像のシーイングのメジアン、限界等級、合計積分時間を表 1 に示す。

3 Data analysis

Suprime-Cam 用リダクションソフト SD-FRED2 (Ouchi et al. 2004) を用いて通常のリダクション (すなわちバイアス引き、フラットフィールドニング、歪み補正、PSF 合わせ、スカイ引き、使えない領域のマスク、モザイクング) を行った。

NB711 の画像に関しては 1 枚あたりの積分時間が長く (900 秒)、宇宙線の影響が大きかったため、フラットフィールドニングののち LACosmic(van Dokkum 2001) を用いて宇宙線除去を行った。リダクション後、各領域ごとに R, i' , NB711 の 3 枚の画像の位置合わせを行い、PSF の一番悪い画像に PSF を合わせた。この処理後の各領域 3 画像のシーイングサイズは J08 で $1.0''$ 、J11 で $0.84''$ であった。その後、SExtractor(Bertin & Arnouts 1996) の double image mode を用いて NB711 の画像を基準に各画像での天体検出を行った。測光は J08 で $1.74''$ 、J11 で $1.4''$ のアパーチャで行った。その後、以下の基準を満たすものを LAE として選択しカタログを作成した (Ouchi et al. 2003)。

$$(R + i')/2 - \text{NB711} > 0.8 \quad (1)$$

$$R - i' > 0.5 \quad (2)$$

$$i' - \text{NB711} > 0 \quad (3)$$

1 つ目の基準は $z = 4.86$ の静止系で輝線の等価幅が $14 \text{ \AA}$ を越えるものを選ぶ基準に相当する。なお、NB711 の 5σ 限界等級以上のもののみを用い、 i' が 2σ 以下のものは除き、R で 2σ 以下のものは 2σ の等級に置換して選択を行っている。結果、J08 領域には 70 個、J11 領域には 186 個の LAE が選択された。

4 Results

選択された LAE 天球分布を図 1 に示す。シンボルの違いは 3 バンドから求めた $\text{Ly}\alpha$ 等価幅の違いで、赤丸 ($\text{EW} \leq 100 \text{ \AA}$)、緑四角 ($100 \text{ \AA} < \text{EW} \leq 240 \text{ \AA}$)、青三角 ($240 \text{ \AA} < \text{EW}$) である。+印の位置が QSO を表し、その周囲の薄い赤の領域 (QSO から physical 3 Mpc) を proximity とする。QSO 周囲で分布に特に非等方性などは見られない。

各領域で選択された LAE に対しての NB711 光度関数を図 2 に示す。赤丸が QSO から 3Mpc 以上離れた blank field、青三角が proximity 内の LAE の光度関数である。いずれの領域でも proximity の内外で大きな違いは見られない。

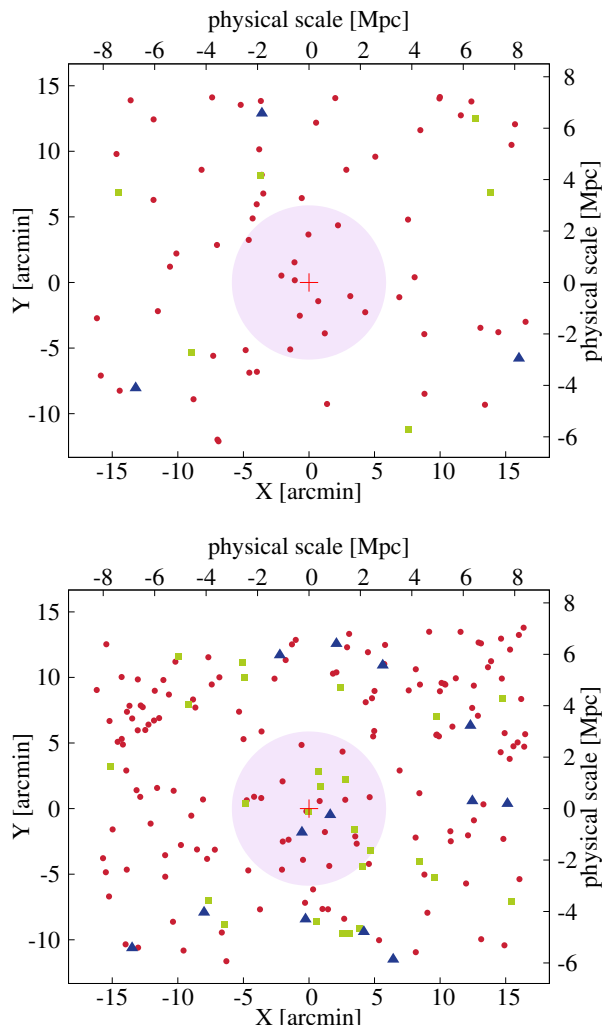


図 1: J08(上、+印)、J11(下、+印) 周辺の LAE の分布。印の違いは $\text{Ly}\alpha$ EW の違いを表す。+印周囲の円形領域は QSO 周囲の 3 physical Mpc 以内の領域を表す。赤丸: $\text{EW} < 100 \text{ \AA}$ 、緑四角: $100 \text{ \AA} < \text{EW} < 240 \text{ \AA}$ 、青三角: $240 \text{ \AA} < \text{EW}$ 。

5 Discussion

図 1 では 2 領域で LAE 密度の違いが見られる。これは限界等級の違いだけではなく 2 領域の密度が intrinsic に違うことによると考えられる。ただし、我々の手法では blank field として (他のサーベイ領域での光度関数ではなく) 同視野内の外側の LAE で比較できるため、cosmic variance にはよらず feedback の影響を見ることができる。LAE は等価幅が大きいほど年齢が若いことが示唆されている (Finkelstein

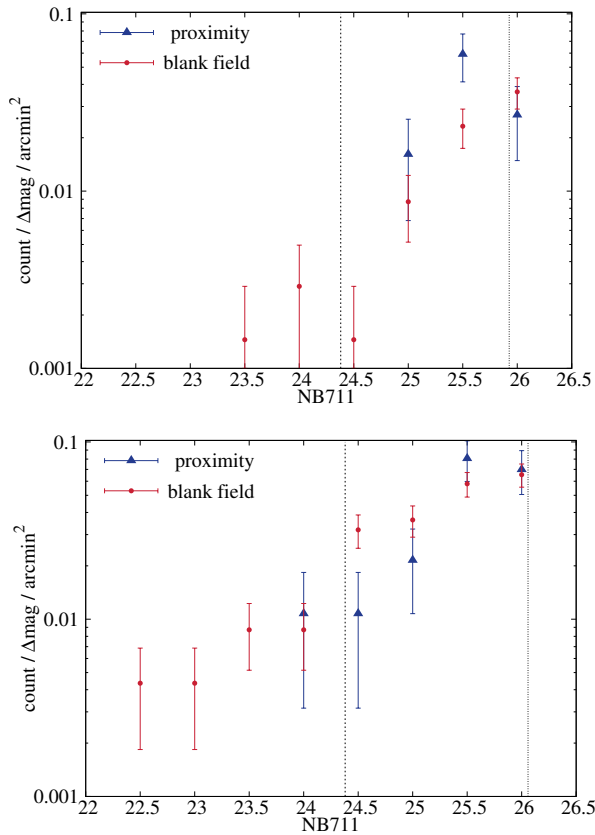


図 2: 各領域における NB711 光度関数を、QSO の近傍 (proximity) とその外 (blank field) に分けてプロットしたもの。青三角: proximity 内に存在する LAE、赤丸: blank field に存在する LAE。点線はそれぞれの領域での 5σ 限界等級、破線は $z \sim 5$ での Ly α 光度関数の折れ曲がる光度。

et al. 2007) ため、等価幅ごとに天球分布を描いたが、等価幅の大きさごとの分布に関して統計的に有意な結果は得られなかった。特に等価幅の大きいもの ($> 240 \text{ \AA}$) の中には Ly α fluorescent system によるコンタミも含まれている (Kashikawa et al. 2012) ため注意が必要である。

図 2 で見たように、2 領域で NB711 で 26 等まで見る限りは flattening はクリアには見られなかった。我々は proximity の距離として 3 Mpc という値を採用したが、これを 2–4 の範囲で変えて同様の図を書いても結果に変化はなかった。図 2 においてそれぞれ $\Delta\text{mag} = 0.5$ で bin 分けしているが、最も暗い bin では 5σ 限界等級より暗い側のものを完全に拾いきれ

ていないこと、及び incompleteness が大きい影響で blank field においても最も暗い bin では一つ明るい bin より数密度が下がっており、ここより暗い側での feedback 効果により強い制限を与えるには積分時間およびサンプルが十分ではないことがわかる。この結果から、少なくとも NB711 で 25.5 等より明るい側では QSO の輻射による低質量銀河形成への feedback は検出されず、より暗い側を見る必要があることが明らかになった。

輻射による feedback が効いていないことの解釈としては、LAE の形成が QSO の形成よりも早いということが考えられる。輻射による SF の抑制は、ガスが低密度の場合に効率よく働き、高密度になると効きにくくなることが示されている (Roos et al. 2015)。このため、低質量銀河であっても QSO に照らされるより前に十分高密度に収縮していれば問題なく SF できる。一方、種族合成モデルから LAE の年齢は数十–数百 Myr と制限がついており (Finkelstein et al. 2006)、これは QSO の寿命 (数十 Myr–数 Gyr, Marconi et al. 2004) と同程度である。

Reference

- Balmaverde, B., 2015, arXiv, 1506.05984
- Bechtold, J., 1994, ApJS, 91, 1
- Bertin, E., & Arnouts, S., 1996, A&AS, 117, 393
- Capak, P., et al. 2011, Nature, 470, 233
- Di Matteo, T., et al. 2005, Nature, 433, 604
- Finkelstein, S., et al. 2007, ApJ, 660, 1023
- Gawiser, E., et al. 2006, ApJ, 642, L13
- Kashikawa, N., et al. 2007, ApJ, 663, 765
- Kashikawa, N., et al. 2012, ApJ, 761, 85
- Marconi, A., et al. 2004, MNRAS, 351, 169
- Ouchi, M., et al. 2003, ApJ, 582, 60
- Ouchi, M., et al. 2004, ApJ, 611, 660
- Roos, O., et al. 2015, ApJ, 800, 19
- Silk, J., & Rees, M. J. 1998, A&A, 331, L1
- Trakhtenbrot, B., et al. 2011, ApJ, 730, 7
- Utsumi, Y., et al. 2010, ApJ, 721, 1680