

Subaru/Hyper Suprime-Cam サーベイを用いた高赤方偏移クェーサー探査

尾上 匡房 (国立天文台三鷹／総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻)

Abstract

初期宇宙に存在するクェーサーは超巨大ブラックホールの形成・成長史や銀河と AGN の共進化、さらには宇宙再電離期を探る上で非常に重要な観測対象である。赤方偏移が 6 を超えるようなクェーサーは SDSS に代表される大型サーベイ観測によって現在までに約 90 個発見されており、これらの多くが宇宙年齢 10 億年未満の時代において 10 億太陽質量程度という莫大な質量のブラックホールを持つ、という観測事実は超巨大ブラックホール形成モデルに大きな制限を与えている。しかし一方で既存の $z > 6$ クェーサーサンプルは低赤方偏移サンプルと比べて数が少なく、またこれらは初期宇宙で最も活発で明るい AGN と考えられるため、高赤方偏移における一般的な超巨大ブラックホールの降着活動を探るためにはより暗いクェーサーを含めた大規模サンプルを構築し統計的にブラックホール質量や質量降着率を調べる必要がある。そこで我々は 2014 年春から観測が開始したすばる望遠鏡による大規模サーベイ計画、Hyper Suprime-Cam (HSC) サーベイにおいて現在のサンプル数を大幅に超える数の高赤方偏移クェーサーを発見することを目指している。クェーサーの検出に通常用いられる二色図による色選択法では褐色矮星に代表される混入天体が障害になるが、我々はこの問題を克服するため可視と近赤外線の多色データを用いた選択法によって、より効率的なクェーサー候補天体選択を行う。本講演では HSC サーベイに適用するクェーサー選択法の概要と有効性を議論した後、HSC 戦略枠プログラム初年度データを用いた高赤方偏移クェーサー探査の初期結果を報告する。

1 Introduction

ビッグバン後の宇宙空間には、いくつかの状態変化があったことが知られている。 $z > 1100$ の宇宙は超高温高密度であったため光子はプラズマの電子に散乱されてほとんど直進できなかったが、宇宙膨張によって空間の温度が下がっていくとやがて宇宙は中性水素で満たされた光学的に透明な世界になった。これを宇宙の晴れ上がりと呼び、晴れ上がり前の最後の散乱面は宇宙背景放射として観測されている。その後暗黒時代と呼ばれる時代の中で初代星、初代銀河が誕生すると ($z \sim 10 - 30$)、それらの紫外放射によって周囲の中性水素は再び電離されていく。初めは光源の天体の周りに泡状に電離水素領域が分布するが、次第に電離泡同士が拡大・結合し最終的に宇宙は電離水素で満たされた現在の姿になった ($z \sim 6 - 14$)。これが宇宙再電離と呼ばれる現象であり、近年の大型望遠鏡の建設と観測技術の進歩により、宇宙再電離がいつ、どのように起こったのかについて現在観

測的な検証が成されている。

クェーサーは活動銀河核の一種であり、中心の超巨大ブラックホール ($M_{\text{BH}} = 10^6 - 10^9 M_{\odot}$) の質量降着活動により典型的な銀河の約 100 倍もの明るさで輝く天体である。特に、高赤方偏移のクェーサーはその明るさ故に遠方宇宙を観測的に探る上で非常に有効な観測対象の一つとなっており、宇宙再電離の進行や超巨大ブラックホールの形成進化といった初期宇宙に関わる様々な謎が高赤方偏移クェーサーの観測によって調べられている。赤方偏移が 6 を超えるクェーサーはこれまで Sloan Digital Sky Survey や Canada-France High- z Quasar Survey (CFHQS), VISTA Kilo-degree Infrared Galaxy (VIKING) Survey をはじめとする可視光・近赤外サーベイ観測によって現在までに約 90 個発見されており (e.g., Fan et al. 2006; Venemans et al. 2013, 図 1)、宇宙開闢後 10 億年未満の宇宙再電離期に既に $M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\text{sun}}$ という最大級のブラックホールが存在していたこと、またこれらがエディントン限界近くの非常に高い質量

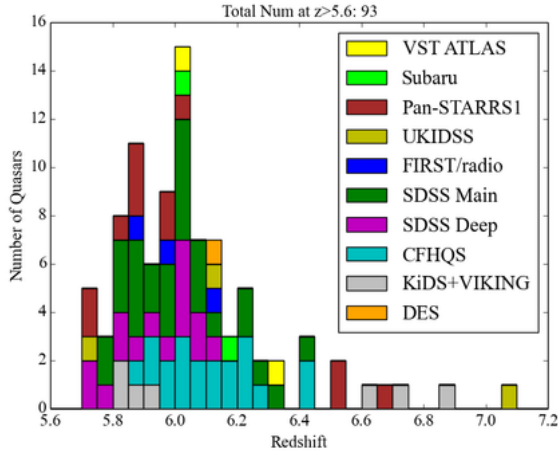


図 1: これまでに発見された $z > 5.6$ クェーサー (93 個) の赤方偏移分布 (2015 年 7 月 15 日現在)。色はクェーサーを発見したサーベイを表す。

降着率 ($\dot{M}_{\text{BH}} \sim \dot{M}_{\text{Edd}}$) で活動している等の観測結果から、超巨大ブラックホールが非常に早期に形成されたことが示唆されている (e.g., Mortlock et al. 2011; De Rosa et al. 2014; Wu et al. 2015)。また再電離についても $z > 6$ クェーサーのスペクトルに現れる銀河間物質 (IGM) 中の中性水素の吸収プロファイルから、IGM の中性度が低赤方偏移から $z \sim 6$ にかけて大きく上昇している ($x_{\text{HI}} \equiv N_{\text{HI}}/N_{\text{H}} > 10^{-3}$) ことがわかり、 $z \sim 6$ において宇宙再電離が未だ進行中であることが確かめられた (e.g., Fan et al. 2006)。

このように既存の高赤方偏移クェーサーサンプルは宇宙再電離期について様々な知見をもたらしてきたが、一方で

- サンプルが最も質量が重く、活発な質量降着活動を行うブラックホールに偏っているため、初期宇宙における一般的なブラックホール成長に制限がつけられない
- 最遠方での IGM 中性度の詳細な z 進化や再電離進行の空間的非一様性、クェーサーの再電離への寄与が不明

といった問題点がある。これらは既存の $z > 6$ クェーサーが非常に明るい種族であること、また低赤方偏移と比べてサンプル数が少ないことに起因しており、

現状の問題を解決する為には**既存のクェーサーよりも暗い種族を含めた大規模高赤方偏移クェーサーサンプル**が必須である。

2 Subaru / HSC Survey

2.1 Overview

Hyper Suprime-Cam (Miyazaki et al. 2012) はすばる望遠鏡の新たな主焦点可視撮像装置であり、先代の Suprime-Cam の 7 倍となる直径 1.5 度の超広視野と CCD の $1\mu\text{m}$ 帯での高い感度が大きな特徴である。HSC サーベイはすばる望遠鏡の世界最高峰の集光能力と HSC の超広視野を生かした大規模可視サーベイ計画であり、5 種の広帯域フィルター (g, r, i, z, y) と狭帯域フィルターを用いて 5 年間で 300 夜の観測を行う。サーベイは観測領域の広さと深さに応じて 3 種類 (Wide: $1,400 \text{ deg}^2$, $r_{\text{lim},5\sigma} \sim 26$; Deep: 27 deg^2 , $r_{\text{lim},5\sigma} \sim 27$; Ultradeep: 3.5 deg^2 , $r_{\text{lim},5\sigma} \sim 28$) に分かれており、ダークエネルギーの解明を軸に銀河進化から太陽系に至るまで各種のユニークなサイエンスが提案されている。8m 級望遠鏡での広視野サーベイ観測は現時点で世界に類を見ないため、HSC サー

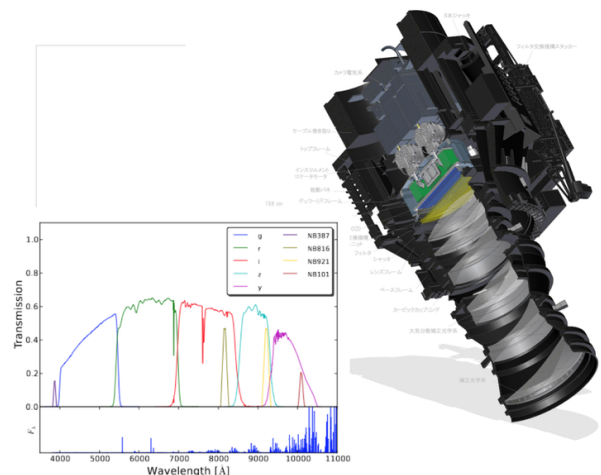


図 2: 右: Hyper Suprime-Cam (Credit: NAOJ)、左: HSC フィルター透過曲線 (HSC サーベイ white paper より抜粋)

ペイは銀河と比べて稀なクェーサーを発見する上で非常に強力な手段となる。

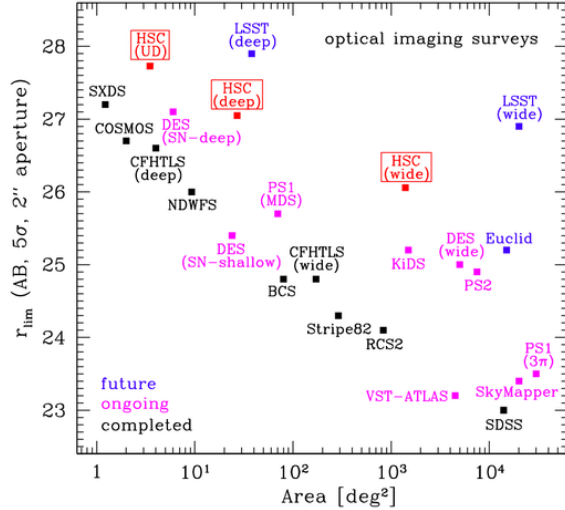


図 3: HSC サーベイと他の可視光サーベイの比較 (HSC サーベイ white paper より抜粋)。横軸はサーベイ領域の広さ、縦軸は r バンドの 5σ 限界等級を表し、既に終了したサーベイを黒、現在進行中のサーベイをマゼンタ、将来サーベイを青で示す。

2.2 High- z Quasar Science with HSC

先述したように、現在の $z > 6$ クェーサーサンプルは数が少なく最も明るいものにバイアスされているため、HSC サーベイによりこれまで見つかっていない暗いクェーサー、つまり質量が軽く ($M_{\text{BH}} \sim 10^8 M_{\odot}$) 活動性が弱いブラックホールを数多く発見することが期待される。このような質量の軽いブラックホールを発見することは、10 億太陽質量という莫大な質量を持つブラックホールが宇宙でいつ、どれくらいの質量で生まれ、どのような質量降着史を経て成長したか、というシナリオを探る上で重要である (Volonteri et al. 2012)。既存の $z \sim 6$ クェーサー光度関数 (Willott et al. 2010b) を基に HSC-Wide サーベイにより発見される $z > 6$ クェーサーの数を見積もとると $z \sim 6$ で ~ 300 個、 $z \sim 7$ で ~ 50 個となる。これは HSC サーベイによって既存のサンプル数を凌駕する量の高赤方偏移クェーサーが発見され、統計

的なサンプルを基にした $z > 6$ ブラックホール質量関数の推定や詳細な再電離期進行プロセスの解明が可能になることを意味する。また、現在のクェーサーの最遠方記録である $z = 7.1$ (Mortlock et al. 2011) の更新も大いに期待されている。

3 High- z Quasar Selection

最も一般的な高赤方偏移クェーサーの選択方法は二色図を用いた選択である。この方法はライマンブレイクによるクェーサー特有の色を使って他天体とクェーサーを分離する方法であり非常に簡便である一方、暗い天体の撮像に伴う撮像誤差によってクェーサー選択領域に混入天体 (特に赤方偏移 6、7 クェーサーの場合、銀河系内の M, L, T, Y 型の褐色矮星) が多く入り込んでしまうという問題点がある。このような問題は、HSC サーベイのような大規模クェーサー探索においては大変深刻であるために、以下に示すような二重の多色選択法を用いて混入天体を極力減らした効率的な高赤方偏移クェーサー候補天体選択を適用する (図 4)。二つの選択法は共に天体の多波長撮像データに対してクェーサー確率と測光赤方偏移 (photometric redshift) を計算し、確率の高い天体をクェーサー候補天体として選択する手法である。

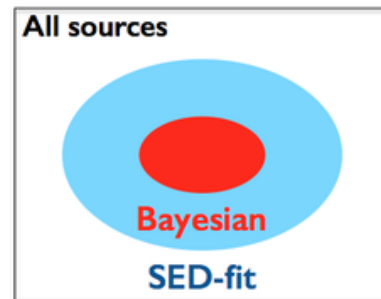


図 4: HSC サーベイにおける $z > 6$ クェーサー候補天体選択の概要。混入天体が少ない Bayesian 法で選択された天体をコアサンプル、SED-fitting により選択された天体をボーナスサンプルとして、コアサンプルに対しては全て分光観測を行い、ボーナスサンプルについては各波長の明るさ、推定された SED を基に一部を分光観測のターゲットとする。

3.1 Bayesian selection

典型的な $z \sim 3$ クェーサー、褐色矮星の色を基に、両者の天球面状の表面密度を確率的な事前情報として与え、HSC の多波長の撮像データからクェーサー候補天体を選択する。この手法は、典型的な明るさと SED をもつクェーサー選択においては最も効率的な選択が可能であるが、一方で非常に明るいクェーサーや通常と異なる SED をもつクェーサーの場合にクェーサー確率を下げってしまう、といったバイアスも含む。

3.2 SED-fitting selection

事前に準備したクェーサー、褐色矮星 SED モデルを多波長撮像データにフィットして両者のフィット度合いから確率的にクェーサー候補天体を選択する。ベイズ選択と相補的にする為に確率的な事前情報は含めず、また連続光・輝線強度、母銀河による減光といったパラメータを基に数百種類のクェーサー SED テンプレートを作成し、様々な SED を持つクェーサーを選択する。SED-fitting 法はベイズ選択法と比べるとより広いクェーサー選択が可能で一方、特にクェーサーと褐色矮星の色が近い赤方偏移で候補天体が増える傾向にある。

4 Current Status

HSC サーベイは 2014 年春から 5 年間のサーベイ観測を開始しており、2015 年 7 月 15 日現在で HSC-Wide 領域のうち約 100 平方度が観測されている。初年度に公開された HSC-Wide サーベイデータ (36deg²) に対して前節で述べたクェーサー選択法を適用した結果¹、現在 1 個の $z \sim 7$ 候補天体を含む計 17 個の $z > 6$ クェーサー候補天体が選択されている²。特に $z \sim 7$ 候補天体については、測光赤方偏移が $z_{photo} = 7.2$ であることから、新たな最遠方クェーサー発見の可能性がある。現在これら候補天体の分光同定をすばる望遠鏡をはじめとする 8m 級

¹近赤外線サーベイである VISTA/VIKING サーベイのデータが存在する領域では可視 5 色と近赤外 5 色の計 10 色を用いて選択を行った

²候補天体の詳細は当日ポスターをご覧ください

望遠鏡に提案中であり、今後は追観測を随時遂行していく。光度関数から推定される現在のサーベイ領域のクェーサー期待値は ~ 4 個であるため候補天体の全てが $z > 6$ クェーサーである確率は低いが、これから初期候補天体の分光結果から、今後さらにクェーサー選択の精度を高めていく予定である。

5 Conclusion

高赤方偏移クェーサーは宇宙再電離史や超巨大ブラックホール形成進化史を探る上で最も有用な観測対象の一つである。我々はすばる望遠鏡/HSC サーベイにおいて既存のサンプル数を大きく超える量の $z > 6$ クェーサーを発見するため、従来よりも効率の良いクェーサー選択法の開発に取り組んできた。現在、HSC サーベイ初年度データから最初の $z > 6$ クェーサー候補天体を選択されており、間もなく最初の HSC クェーサーが発見される予定である。今後 1,400deg² の HSC-Wide サーベイ全領域から高赤方偏移クェーサーを発見し、それらのブラックホール質量等の性質を統計的に探ることで、SDSS 時代には得られなかった新たな初期宇宙、超巨大ブラックホール形成進化過程の知見を得たい。

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。また、日頃より本研究を支えて頂いている HSC サーベイ AGN working group の皆様に感謝いたします。

Reference

- Miyazaki, S. et al. 2012. *SPIE Conference Series*, 8446, 84460Z
- Mortlock, D.J. et al. 2011, *Nature*, 474, 616
- Fan, X et al. 2006, *AJ*, 132, 117
- Venemans, B.P. et al. 2013, *ApJ*, 779, 24
- Wu, X et al. 2015, *Nature*, 518, 512
- De Rosa, G. et al. 2014, *ApJ*, 790, 145
- Willott, C.J. et al. 2010b, *AJ*, 140, 547
- Volonteri, M 2012, *Science*, 337, 544