

Hyper Suprime-Cam による $z \sim 1$ の電波銀河探査

延原 広大 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

Abstract

電波銀河は活動銀河核の一種で強い電波を放射し、母銀河に大質量楕円銀河をもつ。そのため、高赤方偏移の電波銀河は巨大ブラックホールと宇宙の大規模構造の進化を研究する上で重要な天体である。しかし、稀な天体であることから電波銀河探査には広域観測が必要であり、高赤方偏移での探査には高い感度も必要となる。本研究では、広視野、高感度を実現した、すばる望遠鏡の新しい可視光観測装置 Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いたすばる戦略枠サーベイによりすでに観測されている領域 (約 35 deg^2) での電波銀河候補天体 114 天体を選出した。選出にはまず、Faint Images of the Radio Sky at Twenty centimeters (FIRST) の電波源に対し可視光対応天体の同定を行ない、次に、同定された天体に対して色選択を行なっている。色選択には電波銀河の母銀河に passive evolution を仮定し、Bruzual and Charlot 2003 (BC03) のモデルスペクトルの 4000 \AA break が $z \sim 1$ で $i-z$ のカラーを赤くすることから $0.8 < i-z < 1.2$ を基準としている。選出した電波銀河候補天体は radio loud を示したことから、電波銀河であると期待できる。今後はダスト減光を考慮すること、またサンプルのコンタミネーションを見積もりその原因を改善することでより確実な選出方法を確立したい。

1 Introduction

電波銀河は活動銀河核の一種であり、電波源を放射し、母銀河は大質量の楕円銀河である。そのため、電波銀河は銀河団を伴う傾向にあり、銀河団を発見する際の指標としても有用であり、ブラックホールや活動銀河核、宇宙の大規模構造の研究をする上でも重要な天体である。さらに、高赤方偏移の電波銀河はそれぞれの進化を研究する上で重要である。しかし、稀な天体であることから既存の電波銀河の天体数は少なく、高赤方偏移になると、数百天体しか発見されていない。これは、電波銀河探査には広域観測が必要で、高赤方偏移での探査には高い感度も求められるためである。これまでの重要な広域探査の一つに、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) と FIRST で観測されている領域 ($10,000 \text{ deg}^2$) での探査 (Ivezic et al. 2002) がある。この探査では、30,000 天体の FIRST の電波源の可視光対応天体を同定しているが、SDSS の感度が浅かったことが原因で、FIRST 電波源の約 7 割が可視光対応できなかったと報告されている。以上のことから、FIRST の電波源に対して、新たな可視光対応天体を同定することで、そこから電波銀河を選出することができるのではないかと考えた。本

研究で我々は、すばる望遠鏡の新しい可視光観測装置である超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いたすばる戦略枠サーベイによりすでに観測されている領域 (約 35 deg^2) で電波銀河探査を行なった。結果、114 天体の電波銀河候補天体を選出した。HSC は高感度 (SDSS より約 3 等暗い天体まで検出可能) で広視野観測を実現している。

以下では、2 章に選出方法の詳細を記す。本研究では、電波銀河の母銀河に passive evolution を仮定することで、色選択により $z \sim 1$ の電波銀河候補天体を効率的に選び出している。3 章は選出結果と議論、4 章に結論を記す。

2 Sample selection

HSC を用いたすばる戦略枠サーベイでは 5 年間で約 1400 deg^2 の領域が観測される予定で、本研究では現段階で観測されている領域の内、約 35 deg^2 で電波銀河探査を行なった。HSC の限界等級 (AB) は $g \sim 26.5, r \sim 26.1, i \sim 25.9, z \sim 25.1, Y \sim 24.4$ である。一方、先行研究で用いられた SDSS の観測領域は約 $10,000 \text{ deg}^2$ と桁違いに広いが、限界等級は

$u \sim 22.0, g \sim 22.2, r \sim 22.2, i \sim 21.3, z \sim 20.5$ であり、HSC の方が暗い天体まで検出することができる。電波源のカatalogには先行研究と同じ FIRST (Becker et al. 1995) を用いる。FIRST は 1.4 GHz の電波源を SDSS と同じ領域 (約 10,000 deg²) で観測しており、HSC の観測領域もカバーしている。検出限界は 1mJy であり、角分解能は 5" である。サンプルセレクションの流れは図 1 に示し、詳細は 2.1, 2.2 に示す。

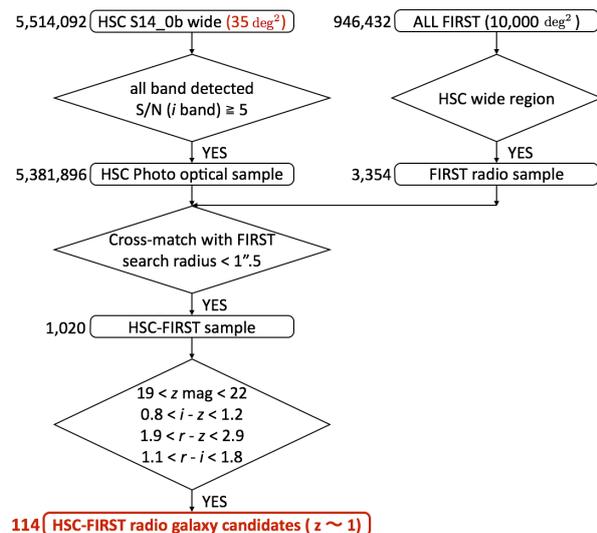


図 1: 電波銀河選出のフローチャート

2.1 電波源の可視光同定について

可視光源は HSC で 5 バンド全てで検出され、i-band で $S/N > 5$ となる天体を HSC Photo optical sample とした。電波源は、本研究で探査を行なう約 35 deg² の領域に存在する FIRST の電波源を FIRST radio sample とした。電波源の可視光同定には Ivezić et al. 2002 で採用されている 1".5 のサーチ半径で HSC Photo optical sample と FIRST radio sample のマッチングを行い、1020 天体を同定した。この 1020 天体を HSC-FIRST sample とする。電波源には、コンパクトな電波源や広がった電波源、ローブ、ジェットなどいくつか種類があるが、FIRST ではコンパクトな電波源が全体の 9 割を占めると報告されている。コンパクトな電波源は座標によるマッ

ピングだけから同定ができるため、現段階ではコンパクトな電波源の可視光対応天体のみを扱っている。

2.2 色選択による電波銀河候補天体の選出方法

電波銀河の母銀河は大質量の楕円銀河であり、passive evolution と似た進化をたどると考えられる。そのため色選択の基準を決める際、電波銀河の母銀河に passive evolution を仮定した。passive evolution では静止波長系での 4000 Å break の影響で、 $z \sim 1$ で $i-z$ のカラーが赤くなる (図 2)。電波銀河以外に

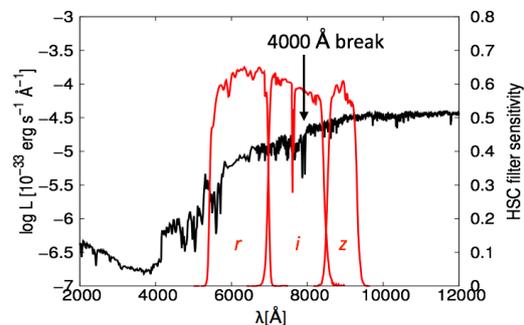


図 2: 4000 Å break について。passive evolution を示すモデルスペクトルとして BC03 より instantaneous burst model を用いている。黒の実線は $z = 1$ での BC03 のモデルスペクトル ($z_f = 10, Z_\odot$)、赤い実線は HSC r, i, z フィルターの応答関数を表している。 $z = 1$ では 4000 Å break が i バンドの波長帯に存在するため、 $i-z$ のカラーは赤くなる様子が分かる。

電波を放射する天体として、星生成銀河が考えられるが 4000 Å break を示さないため、 $i-z$ のカラーは青くなる。 $i-z$ で赤くなるという色選択から星生成銀河は取り除けると考えられる。そこで、BC03 のモデルスペクトルから $z \sim 1$ の $i-z$ のカラーを満たすように $0.8 < i-z < 1.2$ を基準とし、 $0.8 < i-z < 1.2, 1.1 < r-i < 1.8, 19 < z\text{-band mag} < 22, 1.9 < r-z < 2.9$ を選出条件とした。これを満たす HSC-FIRST sample は 114 天体存在した。図 3 に $z_f = 2(Z_\odot), z_f = 3(Z_\odot), z_f = 10(2.5 Z_\odot)$ としたときのモデルスペクトルの r, i, z の二色図を示す。ここで注意しておきたいのは、現在の色選択で

は $z \sim 1$ だけを選出できておらず、 $z \sim 1.6$ の銀河がコンタミネーションとして含まれてしまっていることである。このコンタミネーションを取り除くことは今後の課題である。また、BC03 のモデルスペクトルからカラーを求める際に、ダストによる減光の効果を考慮していない。これは電波銀河が楕円銀河であるためダストが少なく減光の影響が小さいと考えているからだが、全く影響をうけないわけではないため、今後ダストの減光は考慮する必要がある。

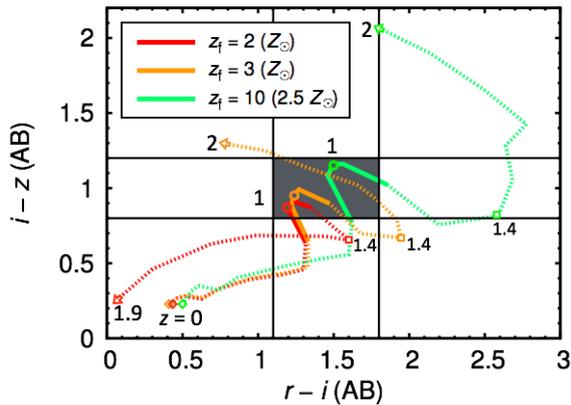


図 3: passive evolution をたどる銀河について、赤方偏移ごとに $r-i$ vs $i-z$ の二色図上での振る舞いを表す。点線はそれぞれ $z_f = 2, 3(Z_\odot)$, $z_f = 10(2.5Z_\odot)$ としたときの振る舞いを表し、実線は $0.8 < z < 1.2$ に対応する。 $z \sim 1$ の電波銀河が選出できるように色選択領域は $0.8 < i-z < 1.2$ を基準にしている。 $1.1 < r-i < 1.8$ を加えることで、 $z \sim 1$ 以外の赤方偏移の天体のある程度除くことができ、 $r-i$ vs $i-z$ の色選択領域をグレーで表す。図示してはいるが、コンタミネーションを除くために $19 < z\text{-band mag} < 22$, $1.9 < r-z < 2.9$ を加えたものを選出条件としている。

3 Results & Discussion

選出された電波銀河候補天体のイメージ画像を図 6 に示す。電波銀河候補天体に対して $z = 1$ と仮定し、radio loudness (R) と radio luminosity を求めた。radio loudness は電波強度を表す指標の一つで

式 (1) の定義式により求められ、 $R > 10$ の天体を radio loud、 $R < 10$ の天体は radio quiet という。

$$R \equiv \frac{L_\nu(5 \text{ GHz})}{L_\nu(4400 \text{ \AA})} \quad (1)$$

今回は、 $z \sim 1$ の電波銀河を選出しているため、 $\lambda_{z \text{ eff}} = 8917 \text{ \AA}$ を用いて、式 (2) から求めている。

$$R \equiv \frac{F_\nu(2.5 \text{ GHz})}{F_\nu(z \text{ band})} \quad (2)$$

$F_\nu(2.5 \text{ GHz})$ については FIRST の電波源 (1.4 GHz) から式 (3) のように変換した。

$$F_\nu(2.5 \text{ GHz}) = F_\nu(1.4 \text{ GHz}) \times \left(\frac{2.5 \text{ GHz}}{1.4 \text{ GHz}} \right)^\alpha \quad (3)$$

α は電波領域でのスペクトルの傾きを表し、典型的な値として $\alpha = -1$ を仮定している。図 4 は radio loudness と radio luminosity のヒストグラムである。

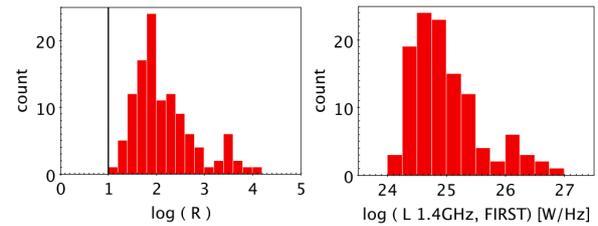


図 4: 電波銀河候補天体 114 天体の R, L_{radio} のヒストグラム

今回選出した天体は全て radio loud を示し、電波銀河は強い電波を放射する天体であることから、電波銀河であると期待できる。しかし、radio loudness と radio luminosity とともに 2 つのピークが見られ、双方の導出には $z = 1$ を仮定していることから、 $z = 1$ 以外の天体がコンタミネーションとして存在することによるものと考えている。現段階での選出条件には改善が必要不可欠で、赤方偏移や、母銀河の質量を推定することで選出された天体の正体を検討し、選出基準の改善へとつなげていきたい。また、radio loudness と radio luminosity の比較から電波と可視光の光度に相関が見られ、大きな電波光度をもつ活動銀河核ほど母銀河の可視光光度は小さいという結果を示した。これは先行研究 (Singh V et al. 2015) の主張と一致する結果になった (図 5)。

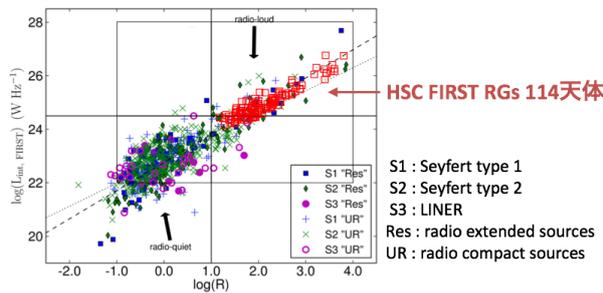


図 5: 電波銀河候補天体 114 天体の R vs $L_{1.4 \text{ GHz}}$ 上での分布を先行研究 (Singh V et al. 2015) に重ねてプロットしている。Singh V et al. 2015 は AGN の一種であるセイファート銀河とライナーのうち、電波放射を持つ天体をプロットしており、電波成分がコンパクトか広がっているかに関わらず相関が見られると報告している。点線が可視光光度を一定としたときの理論線を表しており、破線は分布の傾きを示している。点線の傾きに比べ破線の傾きは急になっている。

4 Conclusion

4000 Å break を用いた色選択により、電波銀河候補天体を 114 天体選出した。選出された電波銀河候補天体は radio loud であり電波銀河であると期待できる。現状ではコンタミネーションの存在が考えられ、完璧な選出条件とは言えないが、本研究で採用した選出条件は $z \sim 1$ の電波銀河探査をするにあたって有用であると主張する。今後は、ダストの影響を考慮することやコンタミネーションの原因の解明から、より正確な選出方法を確立したい。また、赤外領域のデータを用いることで、母銀河の質量や測光赤方偏移の推定も行いたい。電波銀河候補天体を分光観測することで電波銀河の同定も行ないたい。

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。

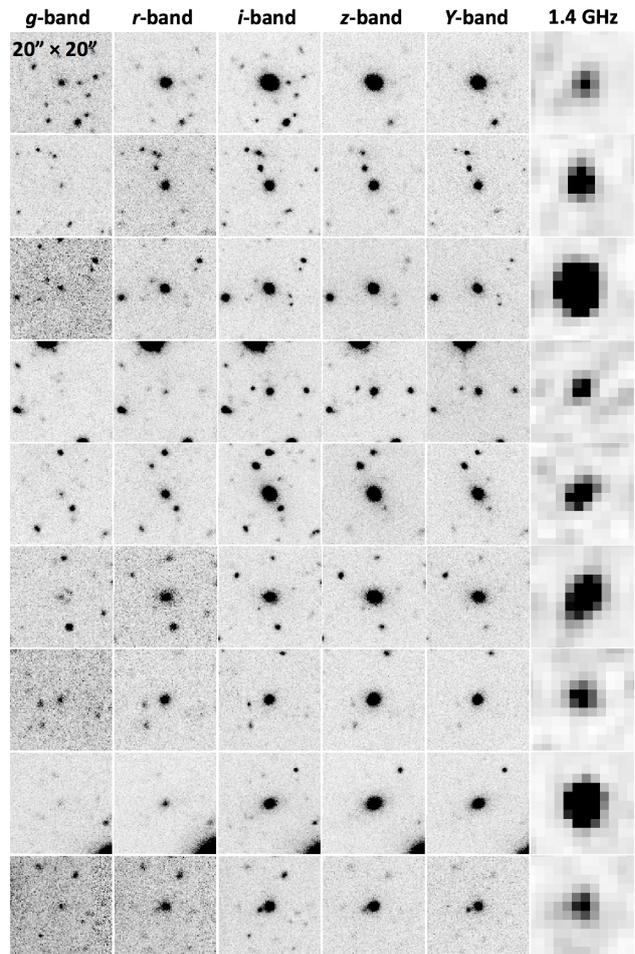


図 6: 電波銀河候補天体のイメージ画像。中心の天体が電波銀河候補天体で、左から HSC g, r, i, z, Y バンド, FIRST 1.4 GHz。サイズは $20'' \times 20''$ である。

Reference

- Becker, R.H., White, R.L., & Helfand, D.J. 1995, ApJ, 450, 559
- Bruzual A.G., Charlot S., 2003, MNRAS, 344, 1000
- Ivezic, Z., et al. 2002, AJ, 124, 2364
- Singh V et al. 2015, MNRAS, 446, 599
- Yamada et al. 2005, ApJ, 634, 861