

## SEDS/UDS 領域における $K - [3.6]$ 赤銀河探査 ～ $z > 5$ の passive 銀河?～

馬渡 健 (東北大学大学院 理学研究科 天文学専攻)

### Abstract

我々は Spitzer Extended Deep Survey (SEDS) の観測領域の一つである UDS 領域において、 $K - [3.6]$  の色で赤い銀河の探査を行った。同領域は可視から近赤外にいたるまで多波長に渡って様々なサーベイが行われてきた領域である。特に広視野かつ深い赤外観測の組み合わせ (SEDS と UKIDSS) は、 $z > 5$  の赤い銀河を含む新しい銀河種族の探査を可能にするものと考えられる。我々は  $K - [3.6] > 1.3$  の赤い色を持つ天体を計 65 天体選び出し、それらの性質について調べた。これらのサンプルの中には (1)  $z > 5$  の受動進化期に入りつつある大質量銀河 (2) あらゆる赤方偏移のダストで赤い銀河 (3)  $z \sim 5$  の星形成/輝線銀河 (4) AGN の 4 種類の銀河が含まれると予想される。我々は  $[3.6] - [4.5]$  と  $K - [3.6]$  の 2 色図上での分布や MIPS/24 $\mu\text{m}$  検出の有無などを用いて、 $K - [3.6]$  赤銀河の物理性質によるグループ分けを試みた。その結果、比較的信頼性の高い  $z > 5$  の passive 銀河候補を計 10 天体選び出した。我々のサンプルは先行研究である  $H - [4.5]$  赤銀河に比べて、数が多い/性質に制限がつけやすい、といった利点があり、重要なサンプルと位置づけられる。

## 1 Introduction

「現在存在するような静的・大質量銀河はいつどこで形成されたか?」:これは近年の銀河観測分野における大きな問題の一つである。CDM 理論に従えば、銀河はより小質量の銀河から階層的に大質量銀河に進化しやがて受動進化期に入る事が予想されるが、観測的な実証はいまだ不完全である。その要因の一つに、星形成銀河に比べて赤い静的な銀河のサンプルが不足している事が挙げられる。遠方銀河観測では常に  $\text{Ly}\alpha$  輝線か強い Ly-break を持つ星形成銀河 (LAEs, LBGs) の観測が先行して行われ、スペクトルに強い特徴のない赤い静的な銀河の観測は比較的困難であった。そのため現状では銀河形成における “building block” ばかりサンプルが充実しており、そこから作られる立派な銀河のサンプルが少ないという事になっているのである。

$z < 3$  においては DRG や JHK 銀河など近赤外撮像に基づいて赤銀河の研究が行われているが、 $z > 3$  になると静的な銀河にとって最大の特徴となる  $4000\text{\AA}$  break が  $K$  バンドを超えてしまうためほとんど研究が行われてこなかった。しかし最近の極めて深い赤

外サーベイの登場により、そうした銀河候補が報告され始めている (Huang et al. 2011, Caputi et al. 2012)。それらの SED は確かに  $4000\text{\AA}$  break で特徴付けられているように見える (図 1 参照)。しかし先行研究には、 $HST$  データに基づくため視野が限られサンプル数が少ない /  $H - [4.5]$  など  $4000\text{\AA}$  break を捉えるためのバンドが波長的に離れているため、より dusty 銀河のコンタミネーションを受け易い、といった問題点もある。

我々が本研究で着目する Spitzer Extended Deep Survey (SEDS) とは 5 つの有名領域において、 $[3.6] \& [4.5] \sim 26$  AB mag ( $3\sigma$ ) の深さまで到達した赤外超深撮像サーベイである。我々はこの中で特に UDS 領域 (又は SXDS 領域) のデータを使用した。UDS 領域は他の領域と違い、SEDS 視野全面に渡って UKIDSS サーベイの世界で最も深い近赤外データ ( $5\sigma \sim 25$  in  $K$ ) が利用可能という利点がある。

## 2 Analysis

我々は UDS 領域で使用可能なデータの中で、視野の広さを優先して、Subaru / Scam /  $B, V, R, i'$ ,

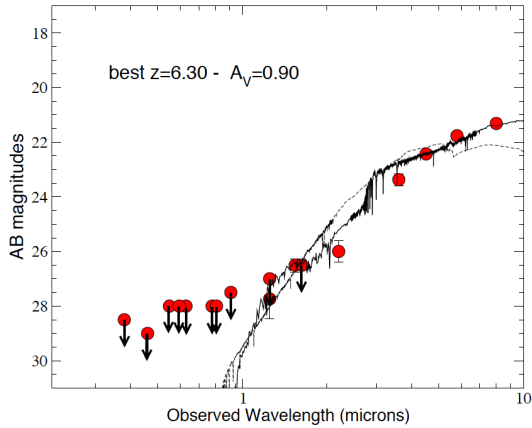


図 1: SED of the  $z \sim 6$  passive galaxy candidate, from Caputi et al. (2012).

$z'$ , UKIRT / WFCAM /  $J$ ,  $H$ ,  $K$ , Spitzer / IRAC / [3.6], [4.5], [5.8], [8.0], Spitzer / MIPS / [24] の計 12 バンドのデータを使用した。また SEDs 視野の一部においては、 $HST$  / ACS / F606W, F814W,  $HST$  / WFC3 / F125W, F160W のデータも使用した。

我々の狙いは  $z > 5$  の赤い静的な銀河であり、そうした銀河の  $4000\text{\AA}$  break を  $K - [3.6]$  の色で捕まえる事に主眼を置いて、以下の selection でサンプルを選び出した。

(i)  $K - [3.6] \geq 1.3(\text{AB})$

(ii)  $K - [3.6] > 0.1 + 4\sigma$  in the color

$K - [3.6] = 1.3$  というしきい値は星種族合成モデル (Bruzual & Charlot 2003) によるモデル銀河を使ったシミュレーションから決定した (図 2 参照)。dust-rich な銀河は入ってしまうが、普通の星形成銀河や近傍銀河はこのしきい値を満たしにくい。図 3 に色等級図上における、選び出された 65 天体の分布を示す。

### 3 Results

$K - [3.6] > 1.3$  の赤い色を持つ 65 天体に対して多波長データから性質に制限をかけていきたいが、ほとんどの天体は  $K$  より短波長側での検出がない。そのため、SED を制限するのは  $K$  よりも長波長側のバン

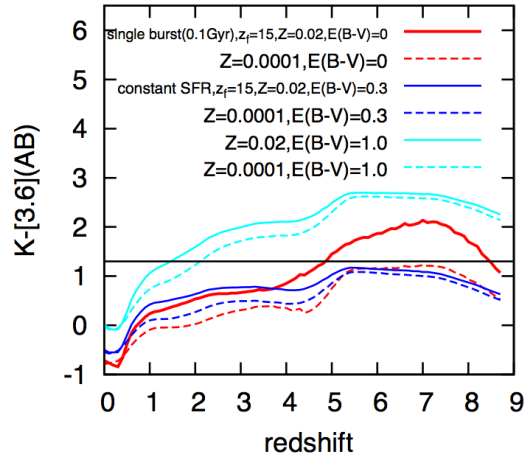


図 2: Several model galaxies'  $K - [3.6]$  colors as a function of redshift, where the redshift galaxies started star formation is fixed ( $z_f = 15$ ). Black line shows the color of 1.3.

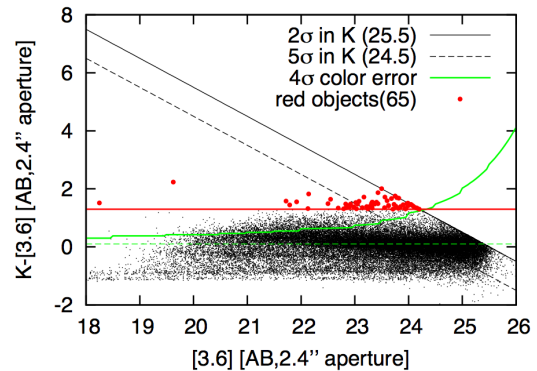


図 3: Red  $K - [3.6]$  objects in the color magnitude diagram. Solid red and green lines show the selection criteria.

ドになる。その波長域の中では [3.6] と [4.5] が圧倒的に深いデータになっているため、ここでは  $K - [3.6]$  と  $[3.6] - [4.5]$  の 2 色の動向を見ていく事にする。図 4 に全天体および、赤銀河 65 天体分の二色図上での分布を示す。赤銀河 (黒大丸) は  $[3.6] - [4.5] \sim 0.3$  を境に 2 つのグループに分かれているように見える。また dusty にせよ passive にせよ赤外域で赤い銀河を選び出してきたにもかかわらず、 $[3.6] - [4.5] < 0$  という青い天体も見られる。これらは単純な星種族合

成モデルでは説明できない位置に存在している事も興味深い。

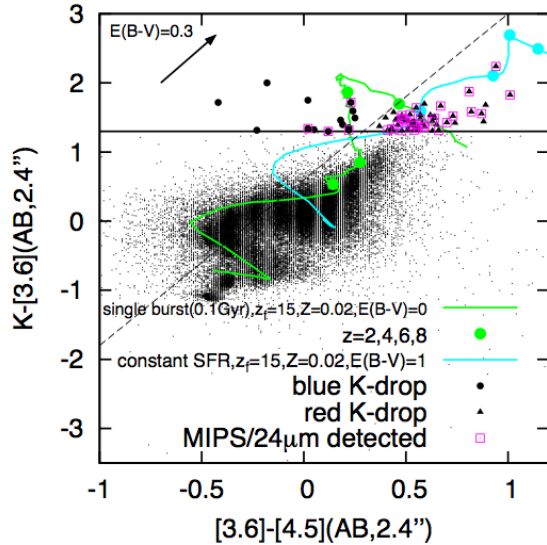


図 4:  $[3.6] - [4.5]$  vs.  $K - [3.6]$  color-color diagram. The horizontal solid line and the dashed line show the boundaries of my single color selection of  $K - [3.6] > 1.3$  and the two color classification, respectively. The arrow on the left-top side shows a reddening vector of Calzetti et al.'s (2000) law of  $E_{B-V} = 0.3$  at  $z = 6$ . Green and cyan curves represent the GALAXEV models of evolutionary sequences over  $0 < z < 9$  of galaxies with  $z_{form} = 15$  for star formation histories of single burst and constant SFR, respectively.

## 4 Discussion

$K - [3.6]$  赤銀河の中には 4 種類の異なる物理性質の銀河種族が含まれると考えられる。基本的には星種族合成モデルのシミュレーション (図 2 参照) から予想される

- (1)  $z > 5$  の受動進化期に入りつつある大質量銀河
  - (2) あらゆる赤方偏移のダストで赤い銀河
- の 2 つである。しかし今回使った星種族合成モデルにおいては nebulae emission を考えていないため、

輝線が見ているバンドに混入するケースが考えられる。輝線によって  $K - [3.6]$  の色が赤くなるケースとして

- (3)  $z \sim 4.5$  の  $H\alpha$  emitter /  $z \sim 6$  の [OIII] emitter が可能性としてはある。最後に

- (4) AGN

によっても  $K - [3.6]$  は赤くなりうる。これらを分離するのは容易ではないが、MIPS 検出の有無と  $[3.6] - [4.5]$  の色によって (1) の赤銀河だけを分離する事は可能である。

MIPS/24 $\mu$ m で dusty 銀河と AGN をはじき、 $K - [3.6] > 2([3.6] - [4.5]) + 0.6$  を満たすのは dusty で赤い銀河であると考え、そのどちらにも分類されない 10 天体が  $z > 5$  の passive 銀河候補となる。

## Reference

shby, M. L. N. et al., 2013, in prep  
 ruzual, G. & Charlot, S., 2003, MNRAS, 344, 1000  
 alzetti, D. et al., 2000, ApJ, 533, 682  
 aputi, K. I. et al. 2012, ApJ, 750, 20  
 uang, J.-S. et al. 2011, ApJ, 742, 13

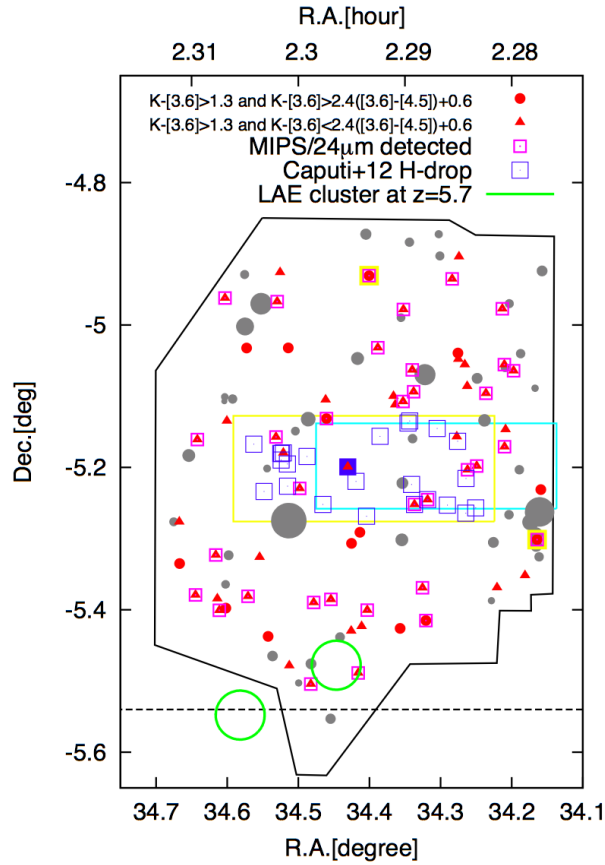


図 5: Sky distribution of the red  $K - [3.6]$  galaxies which are classified into blue  $K$ -drops (filled red squares) and red  $K$ -drops (filled red triangles). Magenta squares are red galaxies with MIPS detection. Blue squares show the red  $H - [3.6]$  galaxies detected in Caputi et al. (2012) and yellow and cyan boxes show their FoVs (*HST*/CANDELS WFC3 and ACS). Proto-clusters traced by LAEs at  $z = 5.7$  detected in Ouchi et al. (2005) are also shown (green circles), where the circle's radius corresponds to 5 Mpc in comoving scale at  $z = 5.7$ .