



LUMINOUS AND HIGH STELLAR MASS CANDIDATE GALAXIES AT $z \approx 8$ DISCOVERED IN COSMIC ASSEMBLY NEAR-INFRARED DEEP EXTRAGALACTIC LEGACY SURVEY

HAOJING YAN, STEVEN L. FINKELSTEIN, KUANG-HAN HUANG, RUSSELL E. RYAN, HENRY C. FERGUSON, ANTON M. KOEKEMOER, NORMAN A. GROGIN, MARK DICKINSON, JEFFREY. NEWMAN, RACHEL S. SOMERVILLE, ROMEEL DAV´E, S. M. FABER, CASEY PAPOVICH, YICHENG GUO, MAURO GIAVALISCO, KYOUNG-SOO LEE, NAVEEN REDDY, ASANTHA R. COORAY, BRIAN D. SIANA, NIMISH P. HATHI, GIOVANNI G. FAZI, MATTHEW ASHBY, BENJAMIN J. WEINER, RAY A. LUCAS, AVISHAI DEKEL, LAURA PENTERICCI, CHRISTOPHER J. CONSELICE

2012/01/25 山田研M1 本田 和志

1. INTRODUCTION

- CANDELS(Cosmic Assembly Near-Infrared Deep Extragalactic Legacy Survey)の大きな目的の一つには、銀河の発展を $z \approx 8$ まで遡ることがある。
- WFC3カメラとACSカメラを用いることによって、近赤外から可視光線まで観測できる。
⇒ dropout法で、 $z \approx 8$ の高赤方偏移銀河を検出することが可能。
- GOODS-Sフィールドにおける深い観測で得られた、8つの $z \approx 8$ の候補銀河を報告する。



2. DATA AND PHOTOMETRY

- CANDELS/GOODS-Sフィールドの深領域で、私たちはF105W(Y_{105})の全て、F125W(J_{125})の83%、F160W(H_{160})の全てで観測を終えている。
- sky positionごとの Y_{105} 、 J_{125} 、 H_{160} における典型的な露光時間は、それぞれ8090、7450、7770秒。
- WFC3の三つのバンドの全てで、有効な露光時間が4000秒以上である領域(62.9 arcmin^2)に、分析を制限。
- CANDELSデータ整理(Koekemoer et al. 2011)の成果は、各ピクセルのスカイと検知器雑音を検知する“RMS maps”を含んでいる。
- 結果として、 $0.''06$ のピクセルスケールを持つfinal mosaicsを得る。



2. DATA AND PHOTOMETRY

- これは、ACSデータと比較可能。
- GOODSのACSデータを、WFC3と同じ0."06のピクセルスケールを持つように再処理。
- ACSのF435W(B_{435})、F606W(V_{606})、F775W(i_{775})、F850LP(z_{850})およびWFC3の Y_{105} 、 J_{125} 、 H_{160} における0."2-radius口径内の平均の5- σ 感度(RMS mapsから測定)は、それぞれ28.04、28.25、27.65、27.48、28.15、28.05そして27.82 mag。
- 測光には、SExtractorを使用。
- 検知イメージとして J_{125} および H_{160} モザイクの加重和使用。
- 3-pixelのFWHM、 7×7 のガウシアンフィルタを使用。しきい値は0.8- σ 。
- MAG_AUTOあるいはMAG_ISO口径のいずれかで測定されて、 J_{125} と H_{160} の中の少なくとも1本のバンド中において $S/N \geq 5.0$ を報告したソースだけを維持。



2. DATA AND PHOTOMETRY

- さらに、0."6のピクセルスケールを持っているGOODS Spitzer IRACデータを利用する。
- 3.6および4.5 μm のチャンネルにほとんど集中。
- 検知はde-blendingを最適化するために"mexhat"フィルタで行われた。
- 1."5-radius(つまり2.5ピクセル)口径を採用し、このサイズの口径が使用された場合に、GOODSプログラムの中で行われる補正([3.6]および[4.5]について、それぞれ-0.55および-0.60 mag)の適用により、"total magnitudes"を得た。



3. SAMPLE(Y_{105} -DROPOUT)

- Y_{105} -dropoutの選択。
- MAG_AUTO測定を採用。
- 主な色基準は、 $Y_{105}-J_{125}>0.80\text{mag}$ 、および4本のACSバンドにおいて $S/N<2$ 。これは、 $z\gtrsim 7.7$ の銀河に敏感。
- 中間赤方偏移の赤い銀河からの汚染を除外するために、 $J_{125}-H_{160}\leq 0.3\text{mag}$ を課す。これは、さらに選択ウィンドウを $z\lesssim 8.7$ に制限し、異常に大きなダスト赤化を持つ、もしくは異常に古い星種族が存在するだろう $z\approx 8$ の銀河にバイアスをかけうる。



3. SAMPLE(Y_{105} -DROPOUT)

- 候補が画像欠陥でないことを確認
⇒4本のACSバンドにおいて、実際に見えないことを視覚的に検査。
- 4本のACSバンドの" χ^2 " sum image(Szalay et al. 1999)を使用して、ACSの中で非検知($\chi^2 < 3.73$)を確認
⇒ Y_{105} にあって、 $S/N < 2$ を持つオブジェクトを選択。
⇒ $Y_{105} - J_{125} > 0.80\text{mag}$ があるものだけを維持。
- Yan et al. (2011)に従い、それらが欠陥ではなく正当なオブジェクトであることを保証するために、それらをsingle-epochの科学イメージ中で、data-qualityフラグなどを用いて分析した。

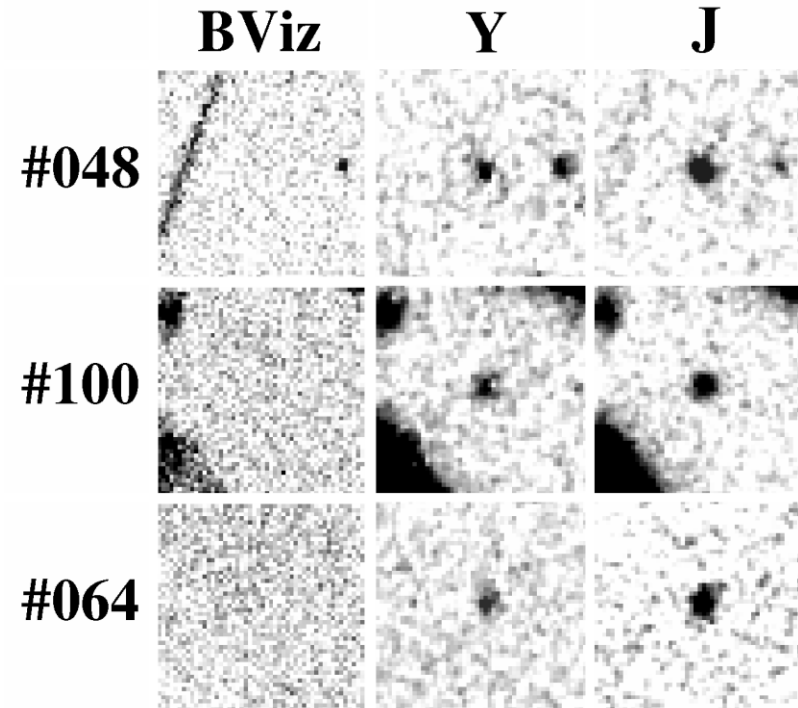


Fig. 2.— Image stamps of the three brightest Y_{105} -dropouts, each $1.''8$ on a side. From left to right, the images are the B435V606i775z850 2-sum images, the Y_{105} -band, and the J_{125} -band, respectively. The locations of the candidates are at the center.

3. SAMPLE(Y_{105} -DROPOUT)

- 結果、この八つの候補が残った。

TABLE 1
PHOTOMETRY OF Y_{105} -DROPOUTS IN CANDELS GOODS-S DEEP REGION

ID ^b	RA & DEC (J2000)	Y_{105} ^a	J_{125} ^a	H_{160} ^a	[3.6] ^b	[4.5] ^b	Y-J	J-H	J-[3.6]
048	3:32:49.936 -27:48:18.101	26.79 ± 0.17	25.65 ± 0.07	25.81 ± 0.10	C	C	1.14 ± 0.2	-0.2 ± 0.1	—
100	3:32:41.417 -27:44:37.831	26.86 ± 0.13^c	25.98 ± 0.14	26.01 ± 0.17	B	B	0.88 ± 0.2	-0.0 ± 0.2	—
064	3:32:48.922 -27:47:07.310	27.06 ± 0.16	26.18 ± 0.09	26.06 ± 0.10	25.00 ± 0.08	25.25 ± 0.18	0.88 ± 0.2	0.1 ± 0.1	1.2 ± 0.1
107	3:32:40.263 -27:44:09.859	> 27.87	26.85 ± 0.26	26.90 ± 0.34	> 26.79	> 26.14	> 1.02	-0.1 ± 0.4	< 0.1
094	3:32:40.675 -27:45:11.624	> 28.27	27.39 ± 0.27	27.39 ± 0.34	C	C	> 0.88	-0.0 ± 0.4	—
035	3:32:34.998 -27:49:21.623	> 28.79	27.55 ± 0.21	27.24 ± 0.19	26.29 ± 0.22	25.67 ± 0.25	> 1.24	0.3 ± 0.3	1.3 ± 0.3
043	3:32:28.893 -27:48:32.245	28.97 ± 0.53	27.64 ± 0.17	28.57 ± 0.54	B	B	1.32 ± 0.6	-0.9 ± 0.6	—
085	3:32:40.044 -27:45:50.584	28.46 ± 0.45	27.64 ± 0.26	27.57 ± 0.30	> 26.96	> 26.30	0.82 ± 0.5	0.1 ± 0.4	< 0.7

^a Magnitudes are MAG_AUTO, and limits are based on $2\text{-}\sigma$ flux upper limits as measured within the same aperture.

^b Magnitudes are MAG_AP within $r = 1''.5$ aperture, and limits are based on $2\text{-}\sigma$ flux upper limits within the same aperture, both of which are with an aperture correction to a total flux. “B” or “C” means that the object is blended with or contaminated by foreground neighbor(s) in IRAC.

^c For ID #100, MAG_AUTO in Y_{105} is too faint because of skewed sky subtraction within the aperture. The quoted magnitude here is based on its MAG_ISO $Y_{105} - J_{125}$ color and its J_{125} MAG_AUTO value.

3. SAMPLE(Y_{105} -DROPOUT)

- Y_{105} -dropoutを、 $Y_{105}J_{125}H_{160}$ の color-colorダイアグラムで、赤方偏移選択関数とともに示す。
- これらの関数は広範囲なシミュレーションによって導かれた。
- $\Rightarrow$ WFC3およびACSモザイクに90,000の人工銀河を入れて、同じ色選択を適用した後に $P(m, z)$ を計算。
- $\Rightarrow$ これらの人工銀河は、70%が指数関数的なディスク、および30%がde Vaucouleurs profileを持っている。それらのサイズは $R(L) \propto L^{0.3}$ に従う。入カスペクトルはBruzual & Charlot (2003)のモデルからで、一定の星形成史(SFH)および50Myrの年齢を持つ。

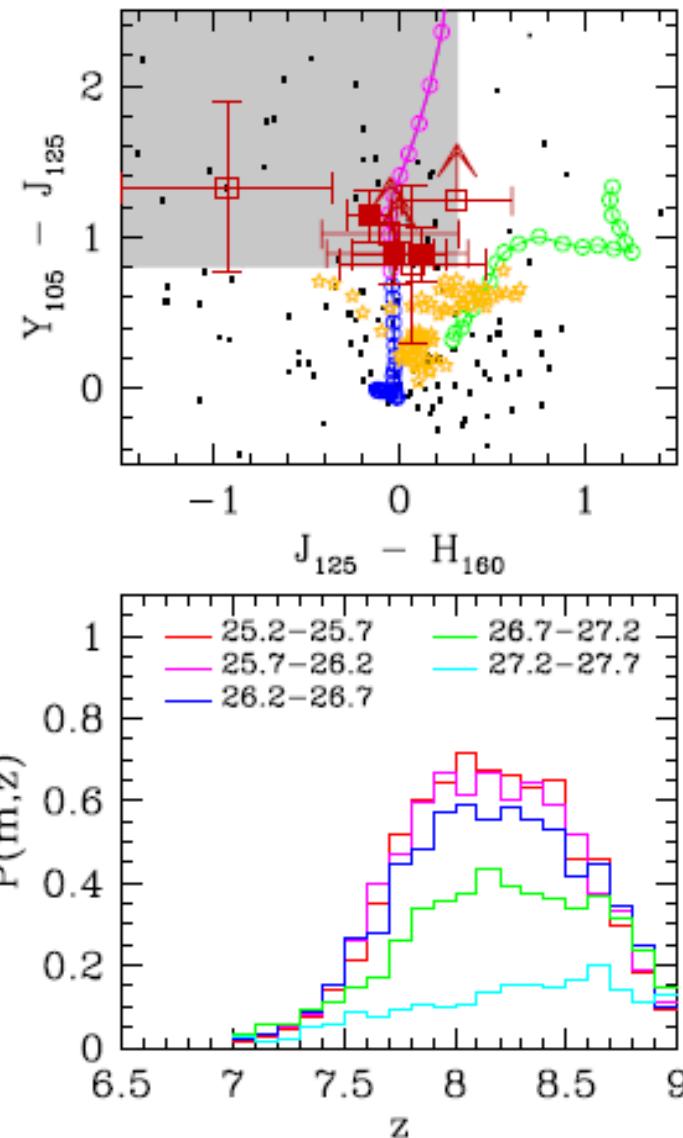


Fig. 1.— (top) Selection of Y_{105} -dropouts in the $Y_{105}J_{125}H_{160}$ color-color diagram. The small dots are field objects that have $S/N < 2$ in ACS. The grey area is our selection region, where the three brightest candidates and the other five fainter ones are plotted as red filled and open squares, respectively. The field objects in this region are those that do not pass the visual examination (see text). The blue-magenta track shows a young galaxy (using a BC03 model of age 100 Myr and no dust extinction) at $z = 5-10$, with the blue section for $z < 7.7$ and the magenta section for $z > 7.7$. The orange stars show the colors of Galactic brown dwarfs (Leggett et al. 2002). The green symbols show the colors of a typical red galaxy at $z = 1-3$ simulated using a BC03 model (= 50 Myr and age of 2.0 Gyr). (bottom) Our redshift selection functions at different magnitude bins, shown as color-coded histograms.

3. SAMPLE(Y_{105} -DROPOUT)

- $r=0.^{\circ}6$ の内のこれらの Y_{105} -dropoutsに相当するものを、IRACから探索。
- ①オブジェクト#100および043は、IRACにて前面の隣接するものと混合してしてしまう。
⇒したがって、有用な情報を抽出することは不可能。
- ②オブジェクト#048および094は、前面の隣接するものによって汚染される。
⇒確実にそれらのフラックスを測定することができない。
- ③オブジェクト#107および085は、IRACにて、適正に分離されたフィールドにある。だが、両方とも、高赤方偏移の銀河には見えない。
- ④オブジェクト#064および035は、IRACによく検知される。また、それらのWFC3対IRACカラーは高赤方偏移にあることと良く一致している。



3. SAMPLE(Y_{105} -DROPOUT)

- ACSにおける非検知の必要条件(各バンドの“ χ^2 ”sum)や、 $J_{125}-H_{160} \leq 0.3\text{mag}$ は、中間の赤方偏移の赤い銀河からの汚染を取り除くのに有効。
- ③の候補のIRACデータは、それらが高赤方偏移銀河ではありそうもないことを支持する。
- $\Rightarrow$ そのようなオブジェクトは、もし光学的に非常に弱いなら、 $1-4\mu\text{m}$ で $J_{125}-[3.6] \geq 2\text{mag}$ のような赤色を持っているはずだ(Yan et al. 2004)。
- $\Rightarrow$ IRACフラックス測定を持っている今回の候補は、全て $J_{125}-[3.6] \leq 1.3\text{mag}$ にいる。



3. SAMPLE(Y_{105} -DROPOUT)

- 別の汚染要因としては、cool Galactic dwarf starsがありえる。
 - ⇒ $Y_{105}-J_{125} > 0.80\text{mag}$ という基準はその汚染をほぼ除外することができるほど十分に大きい。
 - ⇒ さらに、GOODS-Sのような高い銀緯領域のM/L/T-dwarfsの数密度は、恐らく無視できる。(Ryan et al. 2011)
 - ⇒ 更に、Ryan et al. 2011中の私たちの詳細な形態分析は、最も明るい3つを含んでいる私たちの候補が、point-likeより拡張光プロファイルとより一致していることを示す。
- Xue et al. (2011)の4 Ms Chandra catalogには、今回の候補のX-ray counterpartsはない。
 - ⇒ これらのオブジェクトがAGNであるという証拠はない。



4. DISCUSSION

- これらのサンプルは2つの特徴を持つ。
- (1) 既知の最も明るい Y_{105} -dropoutsより、少なくとも $\sim 1\text{mag}$ 明るい、3つの候補($J_{125} < 26.2\text{mag}$)を持っている。
- (2) Y_{105} -dropoutsのうちの2つは、IRACに安全に検知される。それは前の結果(IRACで非検知の Y_{105} -dropoutsだけが報告された)に対する明確な対照にある。
- これは候補の選択におけるcontaminationと incompletenessの結果かもしれない。
- $\Rightarrow$ 異なる口径を使用してプロセスを再現し、これらの基本的な2つの結論が変わらないことを確認。



4. DISCUSSION

- テンプレートフィッティングを通して、IRACに検知された二つの Y_{105} -dropouts (#064および035)のスペクトルエネルギー分布(SED)を分析することにより、それらの星の種族を調査する。
- $\Rightarrow$ EAZYコード(Brammer et al. 2008)およびACS+WFC3測光を使用し、測光赤方偏移(z_{phot})を見積もる。
- $\Rightarrow$ その後、SED(IRAC測光を含む)を、Bruzual & Charlot (2003)の最新のモデルに基づいたテンプレート一式にフィットする。
- テンプレートの特徴は、以下の通り。
- Salpeter IMFおよび $0.02-1Z_{\odot}$ のmetallicitiesを採用。
- 指数関数的に増減するSFH(Papovich et al. 2011)を持っており、与えられたモデルのイオン化する光子の数およびmetallicityに基づいた星雲線を含んでいる。
- $E(B-V)=0-0.5\text{mag}$ におけるCalzetti(2001)のextinction law、およびMadau(1995)の中で説明されるようなHI吸収を仮定。



4. DISCUSSION

- SEDフィッティングの結果は、右図のようになる。
- 星雲線からの寄与がある場合が青、無い場合が赤。
- 両方のオブジェクトが、dropoutの見積もりと一致した z_{phot} 範囲を持つ。
- また、2つのオブジェクトの結果のセットは両方とも、 $10^{9.3-10.2}M_{\odot}$ のオーダーで高い恒星質量(M_{*})を示唆する。
- 星雲線ありの場合では、#064と035はそれぞれ $2.5^{+9.9}_{-0.2}$ および $2.9^{+7.6}_{-0.9} \times 10^9 M_{\odot}$ 、なしの場合では、それぞれ $2.6^{+11.9}_{-0.5}$ および $14.8^{+11.3}_{-2.6} \times 10^9 M_{\odot}$ 。
- エラーバーは、フィットの68%の信頼レベルを反映する。これらの見積もりのうち最低の値($2 \times 10^9 M_{\odot}$)さえ、過去の研究で得られた $z \approx 7$ におけるその平均値の二倍以上だ。
- ⇒驚くほど高い。

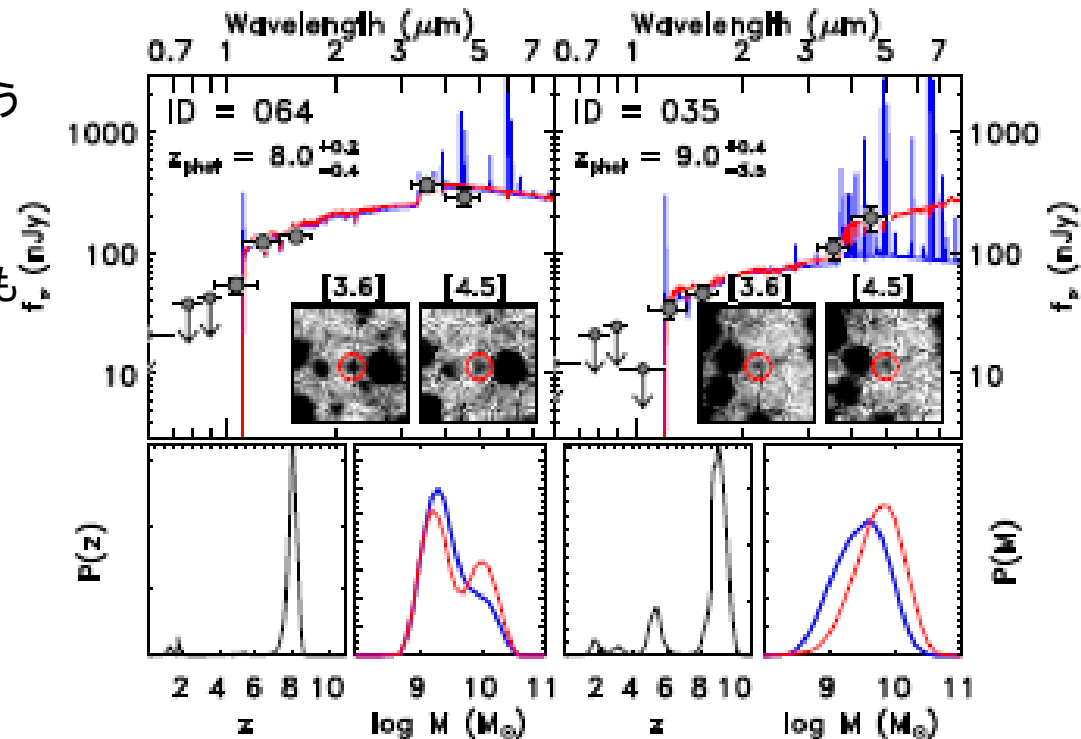


Fig. 3.— Summary of SED fitting results for #064 (left) and 035 (right). The results obtained from the fit with and without the contributions from nebular lines are coded in blue and red, respectively. The top panels show the observed SEDs (grey circles) and the best-fit templates, and the insets display their 3.6 and 4.5 μm image stamps (18."6 $\times$ 18."6). The bottom panels show the likelihood functions of z_{phot} and M_{*} .

4. DISCUSSION

- 見積もられた#064と035の M_* を使用して、high-mass endにおける $z \approx 8$ の銀河の質量関数の最初の測定を得る。
- $7.7 \leq z \leq 8.7$ の調査におけるtop-hat選択関数を仮定して、 $\varphi(\log M_*/M_\odot)|_{9.8 \pm 0.5} = (1.5^{+1.9}_{-0.5}) \times 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3} \text{ dex}^{-1}$ を得る。
- “effective volume” (V_{eff})補正を代わりに適用すれば、 $(3.6^{+8.2}_{-1.1}) \times 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3} \text{ dex}^{-1}$ を得る($dzdV/dz$ を赤方偏移 z におけるunit co-moving volumeとして、 $V_{\text{eff}}(m) = \int dz P(m, z) dV/dz$ を使用する。エラーバーは、サンプル中のポアソンノイズによって引き起こされた不確実性(68%)を反映)。
- バリオンの $\sim 20\%$ が星に変換されたと仮定すると、これらのオブジェクトのホストハロー質量は $\sim 10^{11}$ となる。
- $\Rightarrow$ これは後の時代の最も高い観測値に似ており、 Λ CDMモデル(Komatsu et al. 2011)から予期される $z \approx 8$ におけるハローの数密度と、観測された数密度を一致させるために必要。



4. DISCUSSION

- $7.7 \leq z \leq 8.7$ でtop-hat選択関数を仮定する場合、今回の調査ボリューム内の $z \approx 8$ のグローバルな恒星質量密度へのこれらの2つのオブジェクトの寄与は、 $\rho_* = (6.9_{-0.7}^{+10.4}) \pm 3.0 \times 10^4 M_\odot \text{Mpc}^{-3}$ となる。
- また、 V_{eff} 補正を適用すれば、 $\rho_* = (2.5_{-0.2}^{+2.0}) \pm 1.5 \times 10^5 M_\odot \text{Mpc}^{-3}$ を得る。
- L_V の代用として $4.5\mu\text{m}$ のフラックスを使用して、#064と035の質量光度比を導く。
- 星雲線からの寄与があるフィット結果を使用して、 $M_*/L_V = 0.05_{-0.0}^{+0.2}$ および $0.08_{-0.0}^{+0.2}$ をそれぞれ得る。
- 星雲線からの寄与がないフィット結果を使用して、 $M_*/L_V = 0.05_{-0.0}^{+0.2}$ および $0.43_{-0.3}^{+0.0}$ をそれぞれ得る。
- これは、 M/L_V が高質量の銀河同士でも、著しく異なるかもしれないことを示唆する。



4. DISCUSSION

- $z=8$ を仮定し、J125の測光に基づく、オブジェクト #048、100と064には、それぞれ-21.54、-21.21および-21.01 magの M_{UV} がある。
⇒これは、既知の Y_{105} -dropoutsより5-9倍明るい($z \approx 7$ の銀河でなら観測されている)。
- V_{eff} の補正を適用した後に、五つの0.5-mag bins(25.45、25.95、26.45、26.95、27.45)magの中の段階的なLF、
$$\varphi = (1.1_{-0.3}^{+2.6}, 2.3_{-0.7}^{+3.0}, < 0.8, 1.5_{-0.4}^{+3.4}, 9.8_{-2.8}^{+7.7}) \times 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3} \text{ mag}^{-1}$$
を得る。



4. DISCUSSION

- 数密度対視等級のグラフは右のようになる。
- 過去の文献から得られる $z \sim 7$ や $z \sim 8$ のLFの予測と比較して、明るいオブジェクト($J_{125} \lesssim 26.2 \text{ mag}$)が過剰である。
 - $\Rightarrow$ これは、cosmic varianceに起因するものではない。
 - $\Rightarrow$ このような超過は、他の研究でも示唆されている。
 - $\Rightarrow$ 高赤方偏移におけるLFのbright-endは、必ずしも指数関数的にcutoffする訳ではない。
 - $\Rightarrow$ より低い赤方偏移でUV LFにそのようなcutoffを生じさせる物理学的機構(ダスト減光など)が、高赤方偏移の高質量のハローにおいては重要ではないかもしれないことを示唆する。

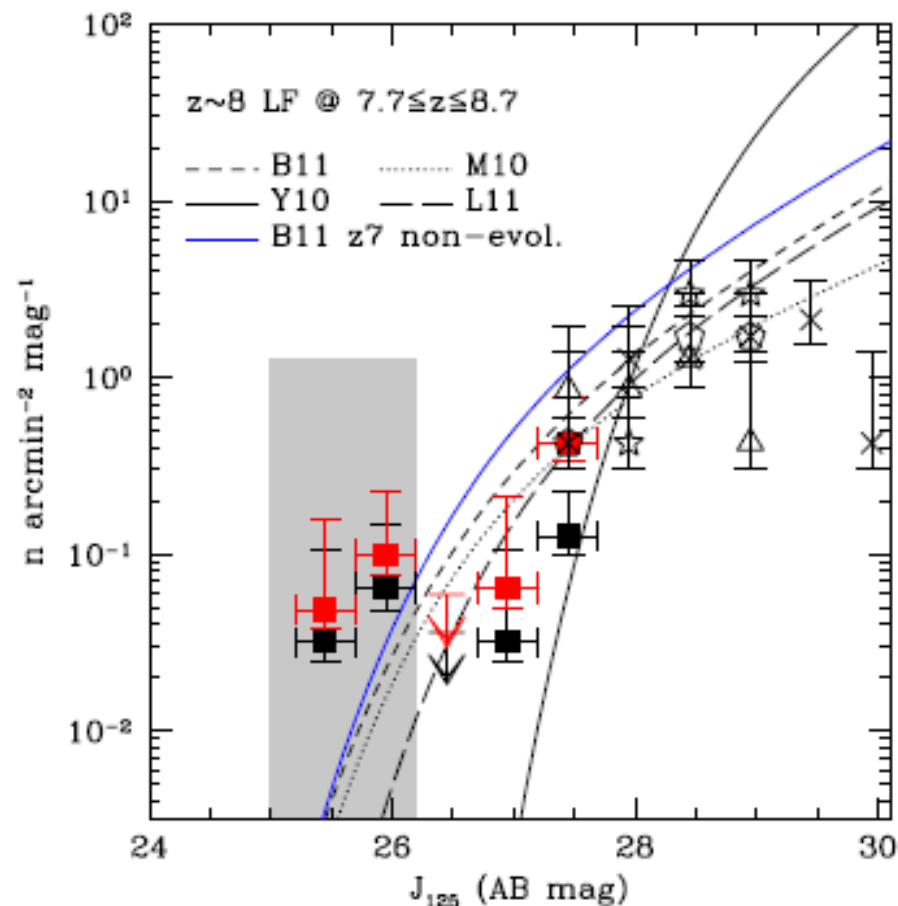


Fig. 4.— Constraints on the very bright-end of the LF at $z \sim 8$ based on the Y105-dropouts in CANDELS/Deep from this current work. The black open squares are the differential surface densities inferred from the number counts in our sample, while the red filled squares are those after correction for V_{eff} with respect to the volume within $7.7 < z < 8.7$. The count predictions over $7.7 < z < 8.7$ are from the Schechter LF estimates at $z \sim 8$ from B11, M10, Y10, and L11 are shown as various black curves, together with a non-evolution one at $z \sim 7$ from B11 as the blue curve. The grey area highlights the very bright-end where there is an excess of $z \sim 8$ galaxies as compared to the expectations from these Schechter LFs. For comparison, different symbols at the faint-end show the raw (observed) surface densities of Y105-dropouts based on the following samples: Y10 (HUDF – stars), B11 (HUDF – crosses; HUDFP1 – pentagons; HUDFP2 – triangles).

4. DISCUSSION

- ただし、サンプル数が少ないので、この結果は統計的に頼りない。
- また、重力レンズがある可能性も除外できない。



5. CONCLUSION

- CANDELS(Cosmic Assembly Near-Infrared Deep Extragalactic Legacy Survey)で、GOODS-Sフィールドにて $z \approx 8$ の銀河の8つの候補を検知した。
- 銀河は、F105W-band dropoutとして観測された。
- $10^{9.3-10.2} M_{\odot}$ のオーダーにて、high-mass endにおける $z \approx 8$ の銀河の質量関数の最初の測定を得た。
- 高赤方偏移におけるLFのbright-endにおける、明るい銀河の高い数密度を見つけた。

