

$z < 1$ の非常に強い [O III] 輝線を持つ銀河の統計的性質

大城 円香 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

Abstract

$z < 1$ の非常に強い [O III] 輝線を持つ星形成銀河に着目した論文を紹介する。これらの非常に強い輝線銀河 (extreme emission line galaxies:EELG) は星質量が小さい矮小銀河で、活発に星形成を行っていて、ガスの金属量がかなり低い傾向があることがわかってきている。このような天体を詳しく調べることは、過去 80 億年の間に急速に進んだ低質量銀河の星質量集積の様子を明らかにすることに加えて、銀河の星質量集積や化学進化の最初期の段階で働く物理機構を理解する上でも非常に重要である。

今回紹介する論文は、COSMOS 天域における分光サーベイのデータを使ってこれらの EELG を見つけて、その性質を調べた研究である。これらの分光データに加えて、COSMOS サーベイの多波長データを組み合わせることで、EELGs の形態、星質量、星形成率、ガス金属量を推定し、それらの間の相関関係について銀河の形成・進化の観点から議論する。

1 Introduction

過去 80 億年の間に急速に低質量銀河の星質量集積が進んでいるのが見られている。それらがどのように進化してきたかについての研究だけでなく、星質量の集積と化学進化の最初の段階で働いている物理的なメカニズムも理解するためにも $z \sim 1$ の活発な星形成矮小銀河の分光測光的な性質の研究は重要である。ここでは、最終的に星質量、金属量、星形成率間の関係から考察を得る。さまざまな赤方偏移でのこれらの関係や形状は未だよく分かっていない。近傍宇宙では質量-金属量関係は $10^8 M_\odot$ まで調べられているが、中間-高い赤方偏移では暗い矮小銀河の調査が不足している。

これら星形成矮小銀河は高い等価幅をもつため、 $z \sim 1$ までやそれより高赤方偏移の深分光探索によって次第に多くの強い輝線銀河 (extreme emission line galaxies:EELG) が発見されるようになってきている。SFDG の進化の調査を目的とした研究の一部として、 $0.2 \lesssim z \lesssim 0.9$ の EELG の物理的性質を調査した。この論文で用いた銀河は同程度の赤方偏移の星形成 (SF) 銀河のこれまでの研究をサンプルサイズや限界等級の面で拡張し、極端に金属量の低い銀河を含めた幅広い特徴を持つ銀河で $10^7 M_\odot$ の低い星質量まで LZR や MZR を調べることを可能にした。

2 Observations and sample selection

The Vimos Ultra Deep Survey (VUDS) は ESO-VLT での VIMOS を使って実行した深分光探索で、 $2 \lesssim z \lesssim 7$ での SF 銀河の種族の詳細な調査を目的としている。観測領域は 3 つの領域 COSMOS, ECDFS, VVDS-2h の合計 $\sim 1 \text{ deg}^2$ をカバーしている。VIMOS スペクトルは積分時間は 14 時間で、観測波長は LRBLUE, LRRED の 2 つのグリズム設定を合わせて $3650 \text{ \AA} < \lambda < 9350 \text{ \AA}$ 、波長分解能は $R \sim 230$ である。

VUDS の対象天体は測光赤方偏移が $z_p > 2.4$ で選ばれるが、その他に多くの $23 \leq I_{AB} \leq 25$ の天体がランダムに選択されている。結果として、たくさんの $z_s < 2$ の天体が同定された。これらの天体の多くは広帯域フィルターの等級を大きくかえるほど非常に強い [O II] $\lambda 3727$ や [O III] $\lambda 5007$ などの可視光輝線をもっている。

非常に信頼性の高い分光赤方偏移を持つ銀河の中から、少なくとも [O II]、[O III]、 $H\beta$ の 3 つの輝線が検出されていて、かつ、 $\text{EW} [\text{O III}] > 100 \text{ \AA}$ の等価幅を持つ銀河を選択した。これらの基準によってガスの金属量を推定することや、最も sSFR が高い星形成銀河を選ぶことができ、平均光度 $I_{AB} \sim 24.5 \text{ mag}$ である 31 個

の強輝線銀河 (COSMOS から 12 個、VVDS-2h から 11 個、ECDFS から 8 個) を同定した。F814W(I)band で HST-ACS によって観測された 16 個の EELG について形態的な情報を得ることができ、図 1 で示されているように円状、不規則、双方の形態を含んでおり、そのサイズは $1''$ より小さいことが分かる。

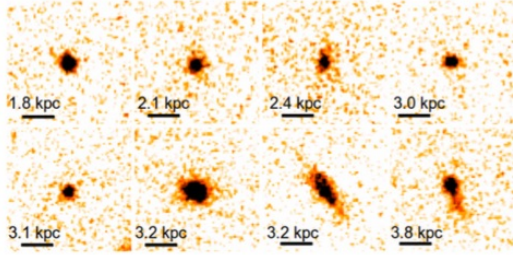


図 1: EELG の HST F814W-band での画像。それぞれ 1 辺は $2''$ で示されている

3 Physical properties of VUDS EELGs

非常に長い積分時間のおかげで、非常に暗い連続光や $[\text{OIII}]\lambda 4363$ や $[\text{NII}]\lambda 6584$ などの暗い輝線を検出できた。赤化の補正はバルマー減滅率を使って行われており、Calzetti et al.(2000) の減光則を用いている。 $H\alpha/H\beta$ または $H\beta/H\gamma$ の測定より、EELG のダスト吸収量の間値は $E(B-V)_{\text{gas}}^{\text{med}} = 0.26 (\sigma = 0.14)$ であり、これはこれまでの EELG の研究結果とよく一致している。 $E(B-V)_{\text{gas}}$ が $H\alpha/H\beta$ または $H\beta/H\gamma$ から測定できない場合、もしくは、CaseB 再結合の理論値より小さい場合、 $E(B-V)_{\text{gas}} = E(B-V)_*$ を用いた。

3.1 Ionization and metallicity properties from VUDS spectra

図 2 で強い輝線の強度比に基づいた 3 つの診断図を使って EELG のサンプルの電離の性質を調べた。サンプルの銀河は強い励起をもつ SF 銀河領域に分布している ($[\text{OIII}]/H\beta \sim 5 \pm 2$)。星質量が小さく U-B カラーが青いことから予測されることであるが、これらの天体全てが AGN の兆候を示していな

い。しかし EELG は図 2 で、高い電離状態に起因して、SF と AGN 領域の境界の近くに位置している。極端な場合、 $[\text{OII}]$ の輝線がほとんど検出されない一方で、 $[\text{OIII}]$ は $\sim 1700\text{\AA}$ もの等価幅を示す。さらに、3 つの EELG から、若い熱い星の存在が示唆される $\text{HeII}\lambda 4686\text{\AA}$ の輝線の兆候を見つけた。これらの EELG は高赤方偏移の低光度銀河に匹敵する高い電離パラメーターを示しており、これは $z < 1$ では非常に稀である。

7 つの EELG で非常に暗く電子温度に敏感なオーロラ線 $[\text{OIII}]\lambda 4363\text{\AA}$ を検出できたので、これらの銀河に対して直接的な方法を使って金属量を求めた。加えて、全てのサンプルに対しても $R23(\equiv \text{OII} + \text{OIII}/H\beta)$ パラメータと McGaugh(1991) の較正を用いて金属量を推定した。直接的な方法を使って導いた金属量とそれらの $R23$ 金属量を一致させるために、Perez-Montero et al.(2013) に従って、Lamareille et al.(2006) による直線関係を適用する。 $R23$ の縮退を除くために、 $z \lesssim 0.45$ の EELG については、 $N2(\equiv \text{NII}/H\alpha)$ パラメータと Perez-Montero & Contini(2009) による較正から得た金属量に合う方の分岐を選び、 $z \gtrsim 0.45$ の EELG に対しては、Maiolino et al.(2008) の $[\text{NeIII}]$ 、 $[\text{OII}]$ 、 $[\text{OIII}]$ の輝線比に基づいた金属量とよく合う分岐を選ぶ。EELG は sub-solar の幅広い金属量を示しており、そのうち 4 天体は $Z \lesssim 0.1Z_{\odot}$ と非常に低い金属量を示した。

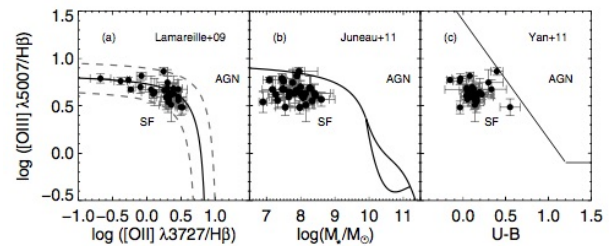


図 2: 輝線強度比を用いた励起状態診断図。実線は SF 領域と AGN 領域の境界線を示している。

3.2 Stellar properties from multi wavelength SED fitting

EELG の星質量と静止系絶対等級を SED フィッティングによって求めた。Castellano et al.(2014) の方法に従って、銀河の紫外線から近赤外線の大帯域測光

を Bruzual&Charlot(2003) 種族合成モデルでフィッティングした。Amorin et al.(2014) の方法に従って、非常に強い輝線の寄与をあらかじめ補正し、モデルは観測されたガスの金属量とよく合う星金属量を仮定する。

Chabrier(2003)IMF、Calzatti et al.(2000) の減光則を選び、指数関数的に減少する星形成史を仮定する。その結果、VUDS での EELG のサンプルは低光度の領域 ($-14.5 \lesssim M_{AB}(B) \lesssim -18.8$) に渡っており、低い星質量 ($6.9 \lesssim \log(M_*/M_\odot) \lesssim 8.6$) を持つことが分かった。

4 The relation between mass, metallicity, and ongoing SFR of low-mass galaxies out to $z \sim 1$

図 3 は VUDS と文献からの EELG に対する SFR-星質量図を示している。星形成率は Kennicutt(1998) の較正を使って減光を補正した $H\alpha$ か $H\beta$ から Chabrier(2003)IMF の仮定のもと推定した。一定の赤方偏移で比べると、今回の EELG は文献からの類似の銀河サンプルより 10 倍低い星形成率および星質量を示している。しかし、図 3 で示されているほとんど全ての EELG はある赤方偏移での星形成銀河の主系列を低質量側へ外挿したものよりも上に位置している。VUDS の EELG は高い sSFR および表面星形成率密度を示しており、同等か、より高い赤方偏移でのより明るいスターバーストと同等である。

図 4 は、VUDS の EELG と他の $0 < z < 1$ の低質量銀河に対する光度-金属量関係、質量-金属量関係を示している。今回の EELG によって、LZR は $M_{AB}(B) \sim -14.5$ 、MZR は $M_* \sim 10^7 M_\odot$ まで調べることが可能になったが、これはこれまでの研究より 1 桁も低い光度および質量であり、調べることができる低質量銀河の数が特に $z \gtrsim 0.5$ で大幅に増えた。比較的ばらつきが大きいものの、VUDS EELG はより明るく重い SFDG の LZR と MZR に従っているように見える。特に近傍宇宙 ($z < 0.3$) での Guseva et al.(2009) の LZR と Andrews&Martini(2013) の

MZR とおおよそ一致している。ただ、ある一定の光度、星質量、赤方偏移においても、等価幅が大きい EELG ほど金属量がより低い傾向がある。これらの銀河は最も高い sSFR で、図 3 で示しているように、ある赤方偏移での星形成銀河の主系列から大きく外れている。これらの銀河は非常に低金属量の銀河が形成する LZR に従う一方で、Green Peas などの銀河と同様に近傍銀河の MZR からは低金属量方向にずれる傾向がある。

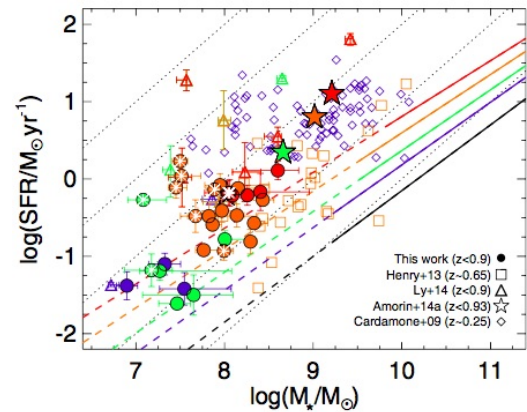


図 3: 低質量 SFDG の SFR-星質量。実線と破線は、異なる赤方偏移での星形成銀河の主系列である。点線は 10^{-10} yr^{-1} から 10^{-6} yr^{-1} までの一定の sSFR を示している。線の色は赤方偏移を示しており、 $\langle z \rangle = 0$ (黒)、 $\langle z \rangle = 0.25$ (青)、 $\langle z \rangle = 0.4$ (緑)、 $\langle z \rangle = 0.6$ (橙)、 $\langle z \rangle = 0.8$ (赤) である。アスタリスクは $EW_{rest}(\text{OIII}) > 200 \text{ \AA}$ と $EW_{rest}(H\beta) > 60 \text{ \AA}$ の VUDS EELG を示している。

上に述べた MZR の SFR への依存は、ある一定の星質量で見ると、sSFR が高い銀河ほどより低い金属量を示すという FMR の観点から説明することができる。図 4 で示されているように採用するパラメータ表示と金属量スケールに関係なく、VUDS の EELG は、FMR の低質量側への外挿におおよそ一致しているように見える。しかし、EELG の FMR における分散は、単に等級で選択された近傍銀河サンプルよりも多少大きいようだ。

これらの結果は、EELG が銀河スケールにわたるスターバーストの初期段階にある非常にガスに富んだ銀河であって、そのスターバーストは低金属量の

ガスの降着によって引き起こされている可能性があるという描像と合致している。

図 4 は MZR の形が低質量側では選択効果に非常に強く影響されていることを示唆している。これらの赤方偏移での等級で選択された分光サンプルにおいては、星形成矮小銀河の種族の中で、非常に強い輝線と高い sSFR、低い金属量を持つガスが豊富な矮小銀河が強調されすぎていて、低質量側での MZR の形が星形成銀の主系列全体をあまりよく表していない可能性がある。この仮定を検証するためには、統計的に十分な星形成矮小銀河サンプルに対する非常に深い分光データを用いた研究が必要不可欠である。VUDS の完全なデータベースを使った解析は、 $z < 1$ の低質量銀河宇宙の詳細を明らかにするだろう。

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。

Reference

- Amorin et al. 2014, A&A, 568, L8
- Amorin, R., Perez-Montero, E., Contini, T., et al., 2014, A&A [arXiv:1403.3441]
- Andrews, B.H., & Martini, 2013, ApJ, 765, 140
- Bruzual, G., & Charlot, S. 2003, MNRAS, 344, 1000
- Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R.C., et al. 2000, ApJ, 533, 682
- Castellano, M., Sommariva, V., Fontana, A., et al. 2014, A&A, 566, A19
- Chabrier, G. 2003, PASP, 115, 763
- Guseva, N. G., Papaderos, P., Meyer, H. T., et al. 2009, A&A, 505, 63
- Kennicutt, R. C., Jr. 1998, ApJ, 498, 541
- Lamareille, F., Contini, T., Brinchmann, J., et al. 2006, A&A, 448, 907
- Maiolino, R., Nagao, T., Grazian, A., et al. 2008, A&A, 488, 463
- Mannucci, F., Salavatterra, R., & Campisi, M. A. 2011, MNRAS, 414, 1263

McGauth, S. S. 1991, ApJ, 380, 140

Perez-Montero, E., & Contini, T. 2009, MNRAS, 398, 949

Perez-Montero, E., Contini, T., Lamareille, F., et al. 2013, A&A, 549, A25

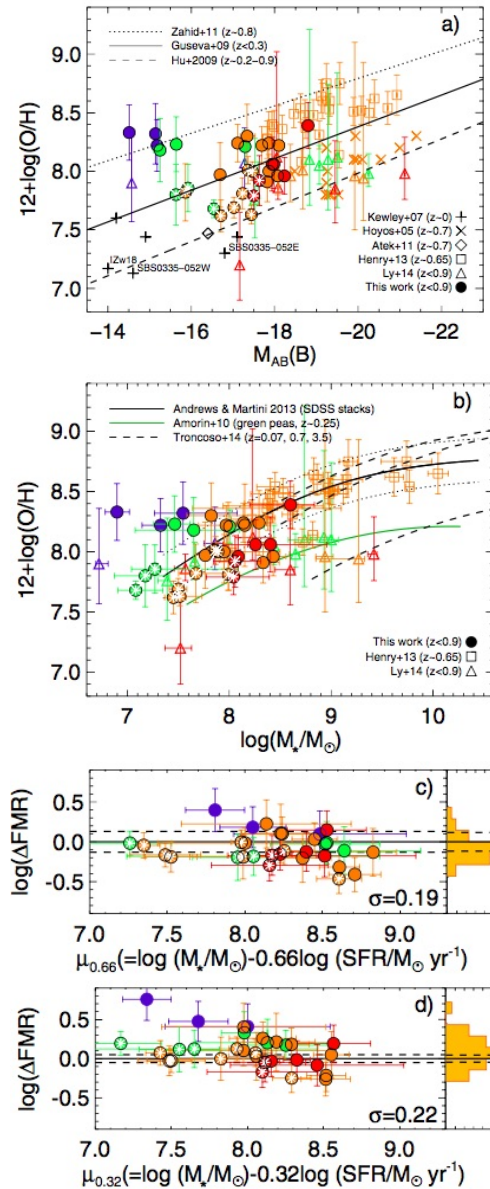


図 4: VUDS の EELG と文献からの星形成矮小銀河についての a) LZR と b) MZR。c) と d) はそれぞれ、Andrews & Martini(2013) と Mannucci et al.(2011) による FMR を低質量側へ外挿した関係からの金属量のずれを示している。