

Keck/LRIS と Subaru/FMOS で探る Ly α 銀河の星間物質の状態

小島 崇史 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

銀河の化学進化を追うことは、銀河形成や星形成の機構を明らかにするために重要である。z \sim 0 の近傍銀河では、ガス状態の金属量、星質量、星形成率の間に Fundamental Metallicity Relation (FMR) という関係があることが知られている。この関係は、高赤方偏移において赤方偏移進化するという示唆があるものの未だに不確実性が大きく残されている。とりわけ、近年の研究で示唆されているように、金属量のイオン化パラメータによる系統的な不定性を除くことは重要である。本研究では、イオン化パラメータによらない金属量決定法である直接温度法 (DTR) を、これまでは注目されていなかった遠方銀河で適用する。DTR を用いてこの系統的な不定性をなくし、FMR の赤方偏移進化の存在を再検証することを目的とする。その第一歩として、DTM に必要な OIII]1661, 1666Å が検出された z=2.16LAE (ID1) の金属量を DTM によって決定する。この ID1 の FMR における関係性と、電離平衡モデルの妥当性について議論する。

1 Introduction

銀河に含まれる元素組成は、銀河形成や星形成に大きな影響を与えている。例えば、ガス状態の金属は一部の輝線放射によって効率的に熱を逃がすため、星形成を進めるはたらきをする。また、金属はダストの材料になるためダスト量とも関係があるものと考えられる。金属はこのように銀河形成に影響をもつため、幅広い赤方偏移にわたる銀河の化学進化を明らかにすることで、銀河形成や星形成と密接に関わる物理的な背景に迫ることができる。

z \sim 0 の近傍銀河では、ガス状態の金属量、星質量、星形成率の間に Fundamental Metallicity Relation (FMR) という図 1 の曲面にのるような関係の存在が観測によって知られている (Mannucci et al. 2010; Lara-López et al. 2010)。この関係は、銀河内の金属生成率、アウトフローによる金属放出量、インフローによるガス流入量などを考慮した解析的モデルによってある程度説明されている (Dayal et al. 2013)。さらに、z=0-2 までの銀河もこの平面に乗るとする一方、z \sim 2.5 ではこの曲面から外れる (図 1、2) とする報告もある (Mannucci et al. 2010; Lara-López et al. 2010)。この曲面からのずれは FMR の赤方偏移進化を表している可能性があり、銀河形成を探る上で重要な示唆である。しかしながら、これら遠方銀河の金属量は不定性が大きいいため、さらに統計を増

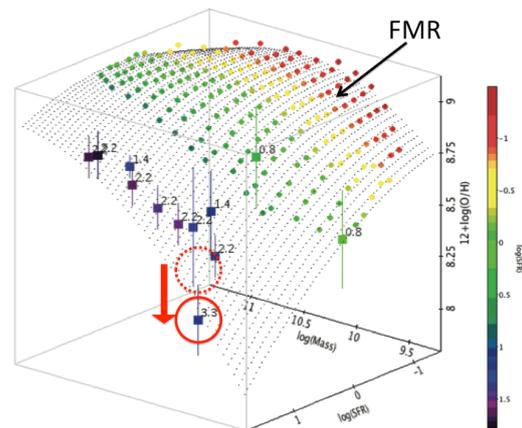


図 1: FMR。金属量 ($12 + \log(\text{O}/\text{H})$) と星質量 (M_*) と星形成率 (SFR) の関係を表す。色つきの丸点は、SDSS のデータを星質量と星形成率のビンごとに分け金属量をプロットしたもの。黒い丸点は、SDSS の従う曲面を表したもの。四角い点は遠方銀河のデータ。添数字は赤方偏移を表す。(Mannucci et al. 2010)

やした調査が必要である。

上記で述べた遠方銀河での観測も含め、これまでの遠方銀河での金属量決定は、強輝線法 (Strong Emission Line; SEL) と呼ばれる方法によってなされてきた。複数の可視輝線 (静止系) の強度比と金属量の間には存在する経験的関係式から、金属量を推量するも

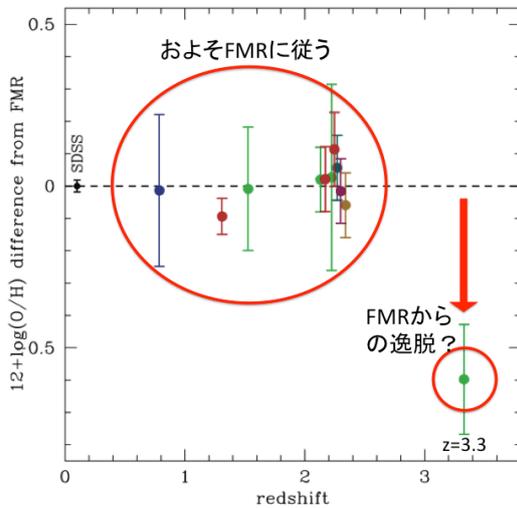


図 2: 赤方偏移に対する FMR からの金属量のずれを表したもの (Mannucci et al. 2010)

のである。しかし、近年の電離平衡モデルを用いた研究 (Nakajima & Ouchi 2014) によると、SEL で用いられてきた関係性はイオン化パラメータ (13.6eV 以上の光子の数密度/水素原子数密度) によって変わってしまうため、近傍銀河に比べて遠方銀河ではイオン化パラメータが大きい傾向にあることも考慮すると、遠方銀河では正確な金属量が得られていなかった可能性がある。

そこで本研究では、他の金属量決定法である直接温度法 (Direct Temperature Method; DTM) に着目した。この手法は、イオンの励起状態が温度だけに依存することを利用したもので、OIII の異なる二つの放射遷移 (図 3) の強度比から電子温度を一意に求めることができる。電子温度と、遷移放射のうち一つの強度が決まれば、他の全ての放射強度も自動的に決まるため、これを利用すれば酸素の存在量すなわち金属量 ($12+\log(\text{O}/\text{H})$) が得られる。これらは全て温度のみで決まる素過程なので、イオン化パラメータに依存しない正確な金属量となる。この手法の近傍銀河での適用例は多いが、DTM で使用できる OIII]1661, 1666Å や [OIII]4363Å といった輝線が他の可視輝線に比べて弱いため、遠方銀河で適用された例はあまりなかった (ex. Erb et al. 2010; Christensen et al. 2012)。しかし、近年の観測によって遠方銀河で OIII]1661, 1666Å が検出される例が出

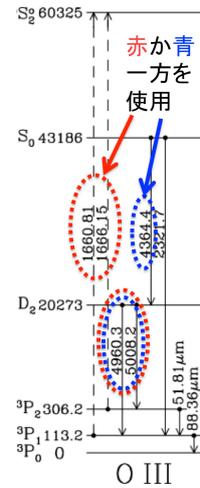


図 3: 2 階電離酸素 OIII の各基底・励起状態と代表的な遷移放射を表したもの (Bruce 2011)

てきつつある。

さらに、我々のグループの観測において、 $z \sim 2.16$ の Ly α 銀河 (ID1) で OIII]1661, 1666Å を含む複数の可視輝線が検出された。本研究ではこの遠方天体に着目し、DTM によって正確な金属量を求める。遠方銀河における DTM による金属量決定としては数少ない例の一つとなる。本研究の目的は、遠方銀河の金属量をイオン化パラメータによらない方法によって正確に決定し、FMR の赤方偏移進化があるのか再検証することである。引き続きサンプル数を増やして統計的な議論を行なう予定だが、その前段階として、ID1 を一例として DTM による金属量決定法を確立するのが今回の発表部分である。Discussion では、この天体の FMR における関係性と、電離平衡モデルの妥当性について議論する。

2 Methods and Observations

2.1 Methods

本研究では DTM によって遠方銀河の金属量決定を行なう。まず始めに、この手法の詳細を述べることにする。

イントロダクションで述べたように、この手法を用いればイオン化パラメータによらずに金属量を決

定することができる。本研究で中心的に用いるのは [OIII]1661, 1666Å である。[OIII]1661, 1666Å のフラックス和 ($F_{1661,1666}$) と [OIII]4959, 5007Å のフラックス和 ($F_{4959,5007}$) の比をとると、これが電子温度 $T_e(\text{OIII})$ と一対一に対応する。電離平衡モデルによって得られた関係が図 4 である。イオン化パラメータによらず $F_{1661,1666}/F_{4959,5007}$ と $T_e(\text{OIII})$ が一対一に対応している様子が分かる。この関係式を用いて電子温度を決定する。

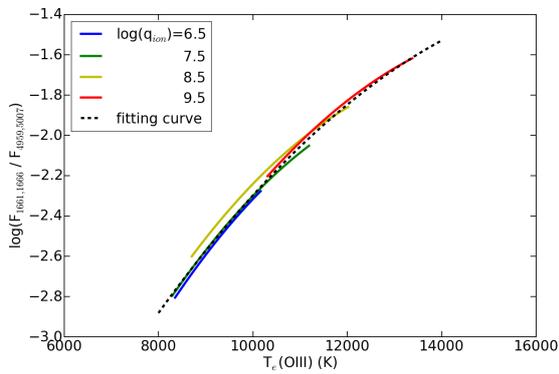


図 4: [OIII]1661, 1666Å のフラックス和 ($F_{1661,1666}$) と [OIII]4959, 5007Å のフラックス和 ($F_{4959,5007}$) の比に対する電子温度 $T_e(\text{OIII})$ を表したものの。イオン化パラメータ q_{ion} によらず、 $F_{1661,1666}/F_{4959,5007}$ と $T_e(\text{OIII})$ が一対一で対応しているのが見て取れる。

電子温度が決定したら、金属量を決定する。ここでは、電離平衡モデルにより得られた Izotov et al. 2006 の式 (1) ~ (3) から求めている。式 (1)、(2) でそれぞれ $t = 10^{-4}T_e(\text{OII})$ 、 $t = 10^{-4}T_e(\text{OIII})$ である。なお、典型的な HII 領域では電子密度が 1000 個/cc 以下となることから電子密度に依存する項を落とす近似を予め導入している。また、式 (3) では、星雲では一般的に O^{3+} 以上の高解離酸素が無視できること、HII 領域では定義上全ての水素が電離していることを考慮している。図 4 で求めた $T_e(\text{OIII})$ から $T_e(\text{OII})$ を求めるために、電離平衡モデルから得られる式を用いる (Izotov et al. 2006)。

また、ID1 の星質量と星形成率は種族合成モデルに対する SED フィッティングから求めている (same as in Shibuya et al. 2014)

$$12 + \log \frac{\text{O}^+}{\text{H}^+} = \log \frac{\lambda 3727}{H\beta} + 5.961 + \frac{1.676}{t} - 0.40 \log t - 0.034t \quad (1)$$

$$12 + \log \frac{\text{O}^{2+}}{\text{H}^+} = \log \frac{\lambda 4959 + 5007}{H\beta} + 6.200 + \frac{1.251}{t} - 0.55 \log t - 0.014t \quad (2)$$

$$\log z \equiv 12 + \log \frac{\text{O}}{\text{H}} \simeq 12 + \log \left(\frac{\text{O}^+}{\text{H}^+} + \frac{\text{O}^{2+}}{\text{H}^+} \right) \quad (3)$$

CLOUDY のモデルとしては、水素密度 $n_{\text{H}} = 100(\text{cm}^{-3})$ 一定とし、volume filling factor は 1 としている。窒素、炭素、ヘリウム以外の元素はビッグバン元素合成によってつくられたものとし、窒素、炭素、ヘリウムは恒星による二次元素合成でつくられたものとする。窒素は López-Sánchez et al. (2012)、炭素、ヘリウムは Dopita et al. (2006b) の値を用いている。電離源としては 50000K の黒体放射を仮定している。

2.2 Observations

ID1 は Keck/LRIS(R~1000) で COSMOS 領域に発見された LAE である。Grating は 600Å(中心波長 4000Å) を使用。露光時間 24000 秒。[OIII]1661, 1666 はこのスペクトルから得る。

可視輝線のうち [OII]3727、[OIII]4959, 5007、 $H\beta$ などは Subaru/FMOS によって観測されたスペクトルから得たものである。

3 Interim Result

3.1 Electron Temperature: T_e

図 4 はイオン化パラメータ $\log q_{\text{ion}}$ を {6.5, 7.5, 8.5, 9.5}(cm/s) とした場合の全ての点を対象に 2 次の RMS フィッティングをかけたものである。このフィッティングカーブに、得られた ID1 の輝線強度比 $F_{1661,1666}/F_{4959,5007}=0.013$ を入れると、対応する電子温度 $T_e(\text{OIII})$ は 11800K と求まった。

3.2 Metallicity: Z

今回の測定では [OIII]4959, 5007 と H β は検出されたが、[OII]3727 は検出されなかった。したがって、式 (1) については上限が、式 (2) についてはその値が得られる。しかし、電離平衡モデルの計算から酸素イオンの比 (O^+/O^{2+}) に制限がかけられるため、式 (2) から式 (1) を推定することができる。これから得られた値は、 $Z=0.27Z_{\odot}$ である。

3.3 Ionization parameter: q_{ion}

同時に CLOUDY の制限を利用した場合に見積もったイオン化パラメータは、 $q_{ion}=9.45$ であった。このとき、酸素イオンの比 (O^+/O^{2+}) = 2.6% であった。

3.4 Other Observables

ID1 の星質量 M_* と星形成率 SFR、色超過 E(B-V) は表 1 で表される通りである。

log M_*	SFR	E(B-V)	χ_r^2
$[M_{\odot}]$	$[M_{\odot}yr^{-1}]$		
9.442 $^{+0.134}_{-0.166}$	34.7 $^{+1.3}_{-1.3}$	0.158 $^{+0.018}_{-0.018}$	6.6

表 1: SED フィッティングから求められた ID1 の物理量と χ_r^2

4 Discussion

他の観測で得られた $z=2-3$ の LAE の値 (See Nakajima & Ouchi 2014 ; Figure. 3) と比べると、ID1 のイオン化パラメータ $q_{ion}=9.45$ は有意に ($\sim 2\sigma$) に大きく、ID1 の金属量は有意に一致した。イオン化パラメータが大きいため、酸素イオンの比 (O^+/O^{2+}) = 2.6% と小さくなっていたものと考えられる。[OII]3727 が観測されなかったのは、イオン化パラメータが大きく OII の存在量そのものが小さくなっていたためと考えられる。また、酸素全体の存在量 ($12+\log(O/H)$) のうち大半が OIII によるものであることから、OIII による見積りもりの不定性がそのまま $12+\log(O/H)$ に効く。OIII のほうは式 (2)

を用いて正確に決めているので CLOUDY を用いたことによる金属量の不定性は小さい。

イオン化パラメータが大きくなっていることについては、簡単のために電離源を黒体放射と仮定したことが原因かもしれない。電離源を種族合成モデルによって得たスペクトルと仮定した場合はもう少し小さくなる可能性があり、早急に種族合成モデルでも確認しなくてはならない。しかし、電離源を変更したことによる金属量の変化はさほど大きくないことが想定されるため、金属量の見積もりとしては今回の値でおおよそよいと考えられる。

今回得られた金属量を用いた場合、Mannucci et al. (2010) の SDSS による FMR におおよそ乗るものと思われる。少なくとも、 $z=3.3$ で見られていたような明らかな逸脱はない。しかし、今回は誤差評価をするに至っていないので、早急な誤差評価が望まれる。さらに、ID1 で SEL による金属量決定を行った場合に、今回見積もられた金属量とどれほどの差が生じるのかを議論することは有意義であろう。これは引き続き課題としたい。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04)、光学赤外線天文連絡会および国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Mannucci, F., et al., 2010, MNRAS, 408, 2115
 Lara-López, M. A., et al., 2010, A&A, 521, L53
 Dayal, P., et al., 2013, MNRAS, 430, 2891
 Nakajima, K., Ouchi, M., 2014, MNRAS, 442, 900
 Erb, D., K., et al., 2010, ApJ, 719, 1168
 Christensen, L., et al., 2012, MNRAS, 427, 1973
 López-Sánchez, Á. R., et al., 2012, MNRAS, 426, 2630
 Bruce, T., D., 2011, Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium, Princeton University Press, NJ
 Izotov, Y., I., et al., 2006, A&A, 448, 955
 Shibuya, T., et al., 2014, ApJ, 784, 74