

分子ガスの観測から探る $z < 1$ での星形成率密度減少の起源

青野 佑弥 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

宇宙の星形成史の理解は銀河進化解明にとって重要である。これまでの研究から、宇宙の星形成率密度は $z \sim 7$ から増加し $z \sim 1-3$ で最も高くなり、 $z=0$ になるにつれて減少していることがわかっている (Madau & Dickinson 2014)。しかし $z \leq 1$ で星形成率密度が下がる原因はまだよくわかっていない。これを説明するシナリオの一つに、 $z \sim 0$ の銀河は $z \sim 1$ の銀河と比べて分子ガスの割合 ($= M_{\text{gas}} / (M_* + M_{\text{gas}})$) が低いため星形成率密度もそれに応じて少なくなっているという考えがある。そこで本発表では $z \sim 1-2.5$ の星形成銀河の分子ガスの割合について調べた Tacconi et al. 2013, ApJ, 768, 74 の紹介を行う。また、今後の研究の展望についても述べる。

Tacconi らは、 $z \sim 1-1.5$, $z \sim 2-2.5$ で $M_* > 2.5 \times 10^{10} M_{\odot}$, 星形成率 $> 30 M_{\odot}/\text{yr}$ の一般的な星形成銀河 58 天体に対し CO(3-2) 輝線の観測を行った。サンプルセレクションに伴うバイアスを補正すると、平均的な分子ガスの割合が $z \sim 1.2$ で 33%, $z \sim 2.2$ で 47% となった。これを現在の値 (8%) と比較することで、分子ガスの割合が現在になるにつれて減少する傾向が見えた。今回の観測から分子ガスの消費時間 ($t_{\text{dep}} = M_{\text{gas}} / \text{星形成率}$) は、 $\propto 1/(1+z)$ となることがわかった。分子ガスの割合 $\propto (\text{星形成率}/M_*) / t_{\text{dep}}$ という関係を用いて、各 z での平均的な分子ガスの割合から星形成率/ M_* の赤方偏移進化を求めると、紫外～赤外の SED フィッティングの結果から求めた星形成率/ M_* と一致した。 $z < 1$ で星質量密度はほぼ一定であるため、これらの結果は分子ガスの割合が $z=0$ に向けて小さくなったことにより $z < 1$ において星形成率密度が減少したというシナリオを支持する。

今回の研究では分子ガスの質量の算出に銀河系内の変換係数を使用しているが、変換係数は金属量に依存するため、正しい分子ガス質量の算出には金属量が求まっているサンプルを用いる必要がある。我々のグループでは近赤外線分光観測により金属量が求まった $z \sim 1.4$ にある一般的な星形成銀河の大規模サンプルを構築しており、これらに対し CO 観測を行うことを計画中である。

1 イントロダクション

1.1 宇宙の星形成史

銀河の進化を考える上で宇宙の星形成史を理解することは非常に重要である。紫外線や可視光や赤外線観測から、宇宙の星形成率密度は $z \sim 7$ から急速に大きくなり、 $z \sim 1-3$ で最も大きくなり、現在にかけて徐々に小さくなっていることがわかっている (図 1; Madau & Dickinson 2014)。しかし、この変化がどのような物理的要因によって引き起こされているかはまだよくわかっていない。 $z < 1$ で星形成率密度が減少することを説明するシナリオとして、分子ガスの割合が $z < 1$ の宇宙の星形成史の減少の原因であるという考え方があ

1.2 分子ガスの割合

分子ガスの研究は、星形成がガスから星への変換であることから重要である。

以下では分子ガスの割合 ($= f_{\text{gas}}$) は式 (1) として議論を進める。

$$f_{\text{gas}} = \frac{M_{\text{gas}}}{M_* + M_{\text{gas}}} \quad (1)$$

分子ガスの割合は銀河がどれだけガスから星への変換を行ってきたかを表す指標になる。

近年、観測技術の向上から $z \geq 1$ の銀河の分子ガスの観測例が報告されてきている (e.g. Tacconi et al. 2010; Daddi et al. 2010) が、観測天体数は 10 天体ほどしかない。

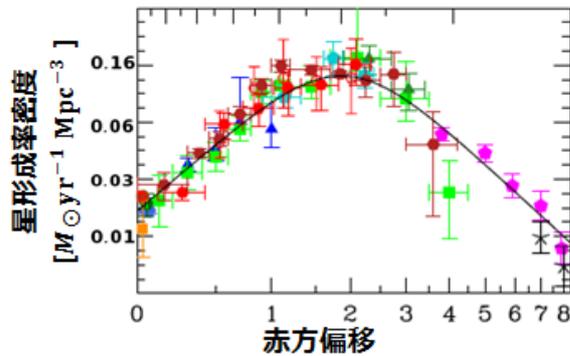


図 1: 宇宙の星形成史。各色はそれぞれ紫外, 可視, 遠赤外の観測から星形成率密度を導いたものである。図は Madau & Dickinson (2014) より。

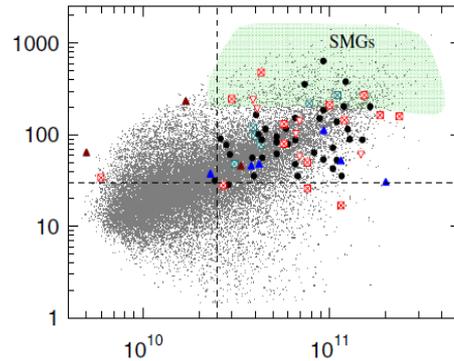


図 2: 今回解析した銀河のサンプル (大きいシンボル) が星形成率- M_* 平面上のどこに位置するかを表した図。灰色の点は COSMOS field にある $1.5 < z < 2.5$ の星形成銀河を表している。灰色の点の多くは星形成率- M_* 平面で一つの直線上にのることがわかる。従ってこの直線上の銀河はこの時代の典型的な銀河であるといえる。今回のサンプル銀河はスターバーストモードの銀河が多少入っているが、典型的な星形成銀河を拾っていることがわかる。

1.3 分子ガス質量

分子ガスの質量は CO(1-0) 輝線の光度に変換係数をかけることで計算できる:

$$M_{\text{gas}} = \alpha \times L_{\text{CO}(1-0)} \quad (2)$$

変換係数 α の単位は $[M_*/(\text{K km/s pc}^2)]$ である。また α は金属量に依存することが知られている。(Genzel et al. 2012)

2 Tacconi et al. 2013

2.1 サンプルセレクション

Tacconi らは EGS 領域で、[OII] の分光観測により $z \sim 1.2$ とわかっている銀河に対して、星質量 $\geq 2.5 \times 10^{10} M_\odot$ 、星形成率 $\geq 30 M_\odot \text{yr}^{-1}$ で選んだ。(図 2 の黒丸) また、 $\text{H}\alpha$ の分光観測により $z \sim 2.2$ とわかっている銀河に対して同じ星質量と星形成率でセレクトを行った。(図 2 の赤い四角と逆三角) これらのセレクションの結果、 $z \sim 1$ で 38 天体、 $z \sim 2$ で 20 天体が選ばれた。

図 2 を見ると今回のサンプルの銀河が典型的な星形成銀河を抜き出したものであることがわかる。

2.2 観測結果

この計 58 天体に対して IRAM Plateau de Bure millimeter interferometer (PdBI) を用いて CO(3-2) 輝線の観測を行った結果、52 天体から輝線が得られた。

解析には、観測した 52 天体に加え、 $z \sim 1$ にあり CO(2-1) が受かっている天体 (Daddi et al. 2010; Magnelli et al. 2012) を 12 天体、 $2 < z$ で重力レンズ天体を 3 天体加えた。(図 2 の緑の四角、青い三角、茶色の三角)

2.3 バイアス補正

今回のサンプルでは $z \sim 1$ で星形成率/ M_* が高めに選ばれてるといふセレクションバイアスがかかっている。このバイアスを補正するために分子ガスの消費時間 ($=t_{\text{dep}} \equiv M_{\text{gas}} / \text{星形成率}$) を用いた。観測した銀河の分子ガスの消費時間の中央値は $z \sim 1.2$ で 0.7Gyr となった。この z のすべての銀河で分子ガスの消費時間が同じだと仮定し、次の式 (3) を用いると低い星形成率/ M_* の銀河に対し f_{gas} を求めるこ

とができる。

$$f_{\text{gas}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(\text{星形成率}/M_*) \times t_{\text{dep}}}} \quad (3)$$

バイアスを補正すると、 f_{gas} は $z \sim 1.2$ で 33%, $z \sim 2.2$ で 47% という結果になった。

2.4 議論

式 (3) を用いると星形成率/ M_* の赤方偏移進化について考えることができる。分子ガスの消費時間は $z \sim 1.2$ で 0.7Gyr であることがわかり、 $z \sim 0$ では 1.24Gyr となることが知られている (Saintonge et al. 2011)。このことから、分子ガスの消費時間は $(1+z)^{-1}$ に比例すると考えられる。また f_{gas} もガスの観測により、過去から現在になるにつれて減少することがわかった。

そこで f_{gas} と分子ガスの消費時間の赤方偏移進化から出した星形成率/ M_* の進化と、SED フィッティングから出した星形成率/ M_* の進化を求めた結果と比べた (図 3)。

図 3 を見るとガスの観測から求めた結果が SED フィッティングによる結果とよく一致していることがわかる。このことは星形成率/ M_* の進化が分子ガスの割合の減少に起因していることを示唆する。

3 考察

次に、星形成率/ M_* と星形成率密度の関係について考察する。星形成率密度は星形成率/ M_* と星質量密度 (ρ_*) の積でかけると考えられる。また、宇宙の星質量密度は $z < 1$ ではほとんど一定で、 $z \sim 2$ では $z < 1$ に比べて 10% ほど低いことがわかっている。(Madau & Dickinson 2014) この星質量密度の進化を用いて星形成率/ M_* から星形成率密度を算出すると次の図 4 のようになることがわかる。

図 4 を見ると、エラーバーが大きく、分子ガスの観測から導いた星形成率密度と Madau(2014) の結果の赤方偏移依存性には有意な違いは見られない。星形成率密度 $\propto (1+z)^m$ とすると、Madau & Dickinson(2014) からは $m \sim 2.7$ であることがわかっているが、ガスの観測から求めた場合 $2.3 < m < 4.4$ と

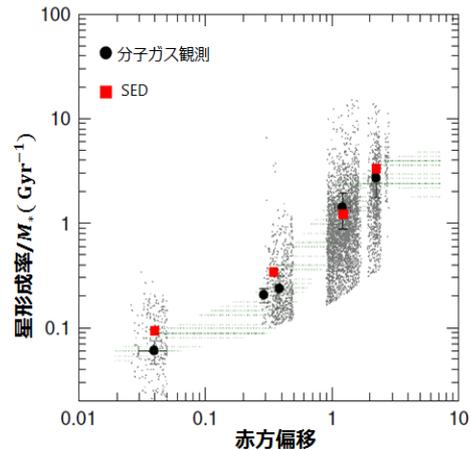


図 3: 星形成率/ M_* の赤方偏移進化。灰色の点は SDSS や CANDELS などの撮像観測から求められた銀河。赤丸は個々の銀河の星形成率/ M_* の平均をとっている。黒い四角はガスの観測から得られた星形成率/ M_* で、 $z \sim 1.2, 2.2$ の四角が Tacconi et al. (2013) の結果になっている。他の赤方偏移の四角については Geach et al. (2011) や Saintonge et al. (2011) などの結果を用いた。

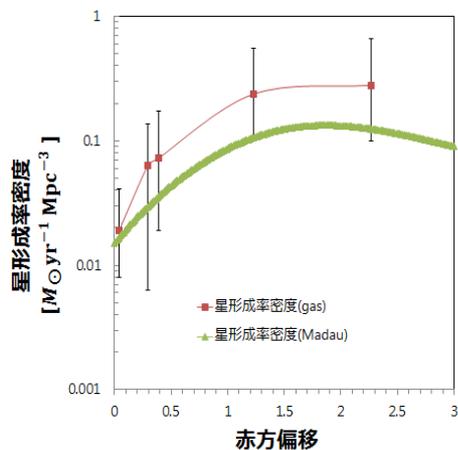


図 4: 星形成率密度進化の Madau & Dickinson(2014) の結果とガスの観測に基づく結果との比較。エラーバーはガスの観測から星形成率/ M_* を算出したときの不定性を表している。

なり、 m が異なるかがわからない。そのため、星形成率/ M_* の不定性を少なくし、その上で星形成率密

度の赤方偏移依存性について議論する必要がある。

我々のグループではすばるに搭載されている FMOS の分光観測により金属量がわかっている銀河のサンプルを構築している。我々のサンプルを用いて、星形成率/ M_* の進化について統計的な観点からも制限をかけたいと考えている。

Madau, & Dickinson 2014, ARA&A, 52, 415

Magnelli, B., Saintonge, A., Lutz, D., et al. 2012, A&A, 548, A22

Saintonge, A., Kauffmann, G., Wang, J., et al. 2011, MNRAS, 415, 61

Tacconi, L. J., Genzel, R., Neri, R., et al. 2010, Natur, 463, 781

Tacconi, L. J., Neri, R., Genzel, R., et al. 2013, ApJ, 768, 74

4 まとめと展望

$z\sim 1.2, 2, 2$ の一般的な星形成銀河 58 天体の CO(3-2) 輝線を観測した。その結果、分子ガスの割合は $z\sim 1.2$ で 33%, $z\sim 2.2$ で 47% になった。 $z\sim 0$ での研究の結果と合わせて、分子ガスの割合は、 $z\sim 2$ から現在にかけて減少していることがわかった。また、ガスの観測から求めた星形成率/ M_* の進化と SED フィッティングから求めた星形成率/ M_* の進化が一致することが確かめられた。これは、星形成率/ M_* の減少が分子ガスの割合が減少していることが原因であることを示唆する。

以上の結果を用いて分子ガスの観測に基づいた星形成率密度の進化を算出し、これを Madau & Dickinson(2014) の結果と比較したが有意な変化の差は得られなかった。しかしエラーバーが非常に大きいため、比較を行うためにはより多数の銀河の分子ガス観測が必要である。そのため現在、 $z\sim 1.4$ で金属量が求まっている銀河の分子ガス観測を考えている。

謝辞

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

Bauermeister, A., Blitz, L., Bolatto, A., et al. 2013, ApJ, 763, 64

Carilli, C. L., & Walter, F. 2013, ARA&A, 51, 105

Daddi, E., Bournaud, F., Walter, F., et al. 2010, ApJ, 713, 686

Geach, J. E., Smail, I., Moran, S. M., et al. 2011, ApJL, 730, L19