

銀河の激動進化期における分子ガス探査

世古 明史 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

銀河は星やガス、ダストの集合体である。星は分子ガスが集まった分子雲内で作られることを考えると、銀河内の分子ガスを調べることは銀河進化の理解に不可欠であると言える。また、ダストも大質量星の超新星爆発に伴って増加していき、水素分子形成や星間空間の冷却を通して星形成に重要な役割を果たすため、銀河進化に大きく寄与する。近年、感度の良い電波望遠鏡により遠方銀河の分子ガスの観測がようやく行われるようになってきている。またハーシェル宇宙望遠鏡の深い観測により遠方銀河のダストの研究も可能になっている。

本発表ではアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) と野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡を用いて行った、銀河の激動進化期 ($z \sim 1.5$) にある星形成銀河の分子ガス観測の結果を報告する。観測対象の一部はハーシェル宇宙望遠鏡によるダスト放射の観測も行われており、分子ガス質量とダスト質量の比の赤方偏移進化について制限を加えることができた。また ALMA の高分解能観測から、楕円銀河の形成過程と考えられる結果も得られ、それについても紹介する。

1 Introduction

これまですばる望遠鏡、ハッブル宇宙望遠鏡などにより遠方銀河の星成分の研究が盛んに行われてきた。その成果では、赤方偏移 $z \sim 2$ 付近で最も宇宙の星形成活動が活発だったことが示されている (Hopkins & Beacom 2006)。また、銀河の形態は $z < 1$ では既に近傍宇宙で見られる形態を示しているが、 $z > 3$ では不規則な形態をしている。すなわち、 $z \sim 1-2$ は銀河の激動進化期であるといえる。

「星はガスから生まれる」ということを考えると、銀河進化の理解には分子ガスの研究が不可欠である。近年、ALMA や IRAM をはじめとする感度の良い電波望遠鏡により遠方銀河の分子ガス探査が行われ始めている (Tacconi et al. 2010, 2013; Daddi et al. 2010, Genzel et al. 2012)。また ALMA の高分解能観測により、遠方銀河の分子ガスの内部構造も探れるようになってきている。これらの研究で、 $z \sim 1.2$ 付近の銀河では分子ガスの割合が $\sim 33\%$ 、 $z \sim 2.2$ 付近では $\sim 47\%$ と近傍銀河に比べて高いことが示されてきている。しかしながらまだ天体数が少なく、星形成率などのパラメータとの相関はまだ明らかになっていない。

これに加え、ハーシェル宇宙望遠鏡により $z \sim 2$

付近のダストの研究も可能になってきた (Elbaz et al. 2011)。ダストはこれまでに作られた星の量の指標になり、また水素分子形成・星間物質の冷却の際にも重要になるため、銀河進化に大きく寄与する。銀河の激動進化期における分子ガスとダストの理解を深めることが銀河進化解明にとって重要であると言える。

2 Observations

$z \sim 1.5$ にある星形成銀河の ^{12}CO 観測を ALMA/Band6 と野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡/TZ 受信機を用いて行った。ALMA の観測は 2012 年 8 月にアンテナ数 23-25 台で行われ、野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡での観測は 2013 年 3 月と 5 月に行った。

2.1 Sample Selection

Subaru/XMM-Newton Deep Survey 領域で、ファイバー多天体分光器 (FMOS) による近赤外域の分光観測 ($\text{H}\alpha$, $[\text{NII}]$ 輝線検出) により、銀河の金属量が正確に定まっているものを選択した (Yabe et al. 2012)。このカタログでは大部分の銀河が $z = 1.2 - 1.6$ に存在している。ALMA の観測対象銀河は比較的様々な

金属量の銀河を選択した (20 天体)。野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡の観測対象銀河は、ハーシェル宇宙望遠鏡/SPIRE 250 μm の測光観測で検出されているものを選択した。また太陽程度の金属量をもつ銀河を対象とした (3 天体)。これは次節で述べる CO-to-H₂ 変換係数の不定性を小さくするためである。野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡の観測では、COSMOS 領域からも基準を満たす銀河を選択した (Roseboom et al. 2012)。

2.2 分子ガス質量の導出

分子ガス質量は以下の式のように銀河から来る CO 分子の光度に係数 α_{CO} をかけることで算出することができ、この係数 α_{CO} を「CO-to-H₂ 変換係数」という。

$$M_{\text{gas}} = \alpha_{\text{CO}} \times L'_{\text{CO}}$$

α_{CO} は銀河の金属量によって変わることが近傍銀河の研究から言われており (Arimoto et al. 1996)、遠方銀河でも言われ始めている (Genzel et al. 2012)。しかし、太陽程度の金属量を持つ銀河の場合は天の川銀河の変換係数とほぼ同じ値を持つことが調べられてきている ($\alpha_{\text{CO}} \sim 3.6 M_{\odot} \text{ km s}^{-1} \text{ pc}^2$; Daddi et al. 2010)。

3 Results

3.1 ALMA

ALMA の高分解能観測により、ある一つの銀河で楕円銀河の形成過程と考えられる結果が得られた。図 1 がその銀河の内部構造を示したものである。ハッブル宇宙望遠鏡による静止系可視光の面輝度分布からは、楕円銀河を示唆する結果が得られている (図 1: オレンジ)。この銀河に対し、ALMA の観測から速度差が約 500 km s⁻¹ ある複数の分子ガス成分があることが分かった (図 1: 水色/白コントア)。また、各々の分子ガス成分の質量は約 $3 \times 10^9 M_{\odot}$ と、小質量銀河の分子ガス質量に匹敵しており、まだこれから星を作る途上を見ているのかもしれない。実際、静止系紫外線の観測からは 2 つの星形成領域があるこ

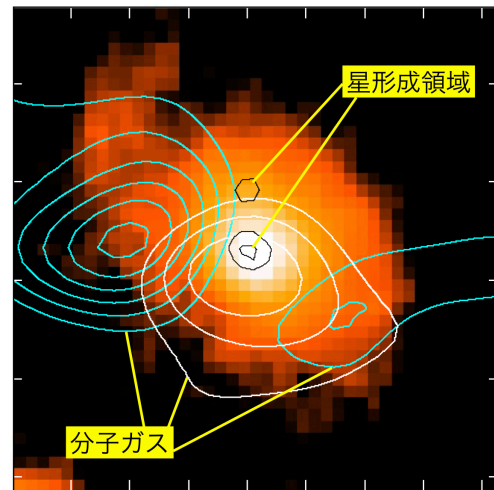


図 1: 楕円銀河形成過程と考えられる銀河の内部構造 (2.5'' \times 2.5''). 水色/白コントア: 複数の分子ガス成分, 黒コントア: 星形成領域, オレンジ: 星の面輝度分布。

とが分かる。このことから、複数の銀河の衝突により楕円銀河が形成されるその途中過程を捕らえたと考えられる。

3.2 野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡

この観測では 3 天体とも CO($J = 2 - 1$) 輝線の有意な検出には至らなかったが、強度に制限を与えることで、分子ガス質量、分子ガスの割合に上限値を設けることができた。それらの値を表 1 に示す。1 天体は非常に小さい分子ガスの割合を示しているが、他の 2 天体は Tacconi et al. (2013) を支持する結果である。

2.1 で書いたように、これら 3 天体はハーシェル宇宙望遠鏡によるダストの観測もされており、ダスト質量が求まっている。今回の CO 観測から求まった分子ガス質量の上限値と合わせ、 $z \sim 1.5$ におけるガス・ダスト比を算出し、制限を与えることができた。それらの結果を表 2 に示す。

表 1: 野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡の結果

source	L'_{CO} K km s ⁻¹ pc ²	M_{gas} M_{\odot}	f_{gas}
SXDS1	$< 2.6 \times 10^{10}$	$< 9.4 \times 10^{10}$	$< 14\%$
SXDS3	$< 2.0 \times 10^{10}$	$< 7.2 \times 10^{10}$	$< 40\%$
COSMOS9	$< 2.8 \times 10^{10}$	$< 1.0 \times 10^{11}$	$< 42\%$

$$*M_{gas} = 3.6 \times L'_{CO}, \quad *f_{gas} = \frac{M_{gas}}{M_{gas} + M_*}$$

表 2: ハーシェル宇宙望遠鏡の結果

source	$F_{250\mu m}$ mJy/beam	M_{dust} M_{\odot}	δ_{GDR}
SXDS1	41.47	4.9×10^8	< 190
SXDS3	56.13	6.9×10^8	< 100
COSMOS9	26.35	3.4×10^8	< 300

M_{dust} 算出時、 $*T_{dust} = 35K$, $\beta = 1.5$ を仮定。

$$*\delta_{GDR} = \frac{M_{gas}}{M_{dust}}$$

4 Discussion

4.1 ALMA

3.1 で書いたように、ALMA とハッブル宇宙望遠鏡の観測により楕円銀河形成過程と考えられる銀河を発見した。シミュレーションや近傍銀河の観測から、楕円銀河は「複数の銀河の衝突・合体によって形成された」というシナリオが有力視されている。今回の観測結果はこのシナリオを支持するものである。

図 1 の白コントアは楕円銀河の中心部分に位置し、星は既に多く作られており、また星形成領域も付随している。この領域は分子ガスがまだあることから、今後も星形成が続くと考えられる。もう一つの星形成領域には星は比較的多く存在するが、分子ガスが枯渇している。この領域は銀河衝突の衝突面で爆発的に星形成を行った可能性がある。こういった検証は、領域ごとの金属量を調べることで、その領域のこれまでの星形成史を明らかにできると期待される。図 1 の水色コントアは銀河の外縁部に位置しており、まだ星は少なく星形成領域も見られないが分子ガスは大量に存在している。したがって、これから星形成が起こる可能性があるが、単にダストによって星

形成活動が隠されているのかもしれない。これらの区別には H α の輝線を捕らえ、隠された星形成の有無を調べることが有効である。そこで各領域の H α と [NII] を受ける面分光観測を行う観測提案をしており、このサンプルは楕円銀河形成過程の解明に向けて非常に貴重なものである。

4.2 野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡

今回野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡で観測した 3 天体は、CO-to-H $_2$ 変換係数の不定性を小さくするため太陽程度の金属量を持つものを選択した。Inoue (2003) の銀河のガス・ダスト比の宇宙論的進化の理論計算によると、太陽程度の金属量を持つ $z \sim 1.5$ の銀河は、 $z = 0$ の近傍銀河に比べて 1 桁程度大きくなっている (図 2 「注: 横軸はダスト・ガス比 ($=M_{dust}/M_{gas}$) のため $z = 1.5$ の方が小さい」)。しかし今回の結果は、理論計算による予測値よりも小さいガス・ダスト比 (=大きいダスト・ガス比) であることを示している。すなわち、ガス・ダスト比には宇宙論的進化がそれほど見られないという結果である。

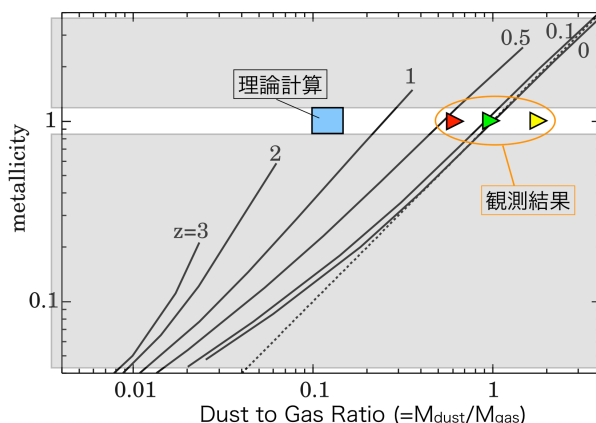


図 2: ダスト・ガス比 ($=M_{dust}/M_{gas}$) の赤方偏移進化の理論計算と今回の観測結果との比較。金属量 (縦軸)、ダスト・ガス比 (横軸) は天の川銀河の値で規格化している。青四角: 理論計算による太陽程度の金属量を持つ $z \sim 1.5$ の銀河のダスト・ガス比。三角: 今回の観測結果 (ダスト・ガス比は下限値)。黄: SXDS3, 緑: SXDS1, 赤: COSMOS9

5 Conclusion

銀河の激動進化期 ($z \sim 1.5$) における星形成銀河の分子ガス探査を ALMA と野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡を用いて行った。ALMA の高分解能観測からは、楕円銀河形成過程と考えられる銀河が見つかった。ハッブル宇宙望遠鏡の観測とも合わせると「複数の銀河が衝突・合体し楕円銀河を形成する」という楕円銀河形成シナリオを支持する結果だと考えられる。さらに詳しい形成史を探るために、 $H\alpha$, [NII] を狙った面分光観測を提案中である。野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡の観測からは、 $z \sim 1.5$ の銀河の分子ガス質量、その割合、ガス・ダスト比に制限を与えた。特にガス・ダスト比の宇宙論的進化は理論計算で示されているほどの進化は見られなかった。

Reference

- Arimoto, N. et al. 1996, PASJ, 48, 275
Daddi, E. et al. 2010, ApJ, 713, 686
Elbaz, D. et al. 2011, A&A, 533, 119
Genzel, R. et al. 2012, ApJ, 746, 69
Hopkins, A. M. & Beacom, J. F. 2006, ApJ, 651, 142
Inoue, A. K. 2003, PASJ, 55, 901
Roseboom, I. G. et al. 2012, MNRAS, 426, 1782
Tacconi, L. J. et al. 2010, Nature, 463, 781
Tacconi, L. J. et al. 2013, ApJ, 768, 74
Yabe, K. et al. 2012, PASJ, 64, 60