

ALMA アーカイブデータを用いたミリ波輝線銀河光度関数の制限

山口 裕貴 (東京大学大学院 理学系研究科天文学専攻 M1)

Abstract

本研究では ALMA アーカイブデータを用いたミリ波分子輝線銀河光度関数の制限について報告する。本研究で使用したアーカイブデータは ALMA 初期科学観測 (Cycle 0) で行われたものであり、重力レンズ領域である銀河団 Abell 1689 の Band 6 (230 GHz 帯) の観測である。この観測は広さおよそ 5 平方分で深さは連続波で $1\sigma = 90 \mu\text{Jy}/\text{beam}$ を実現している。このデータから速度分解能を変えた 3 次元データを作成し、ミリ波分子輝線天体の探査を行った。なお、再解析後のデータはおよそ 30 km/s の速度分解能で $1\sigma = 2.5 \text{ mJy}/\text{beam}$ である。今回の研究では $> 5\sigma$ のレベルで検出された天体はなかったが、光度関数に上限値を与えることに成功した。一方で、観測周波数 241.03 GHz 付近に 3σ のレベルで輝線検出候補天体も見つかった。この候補天体については HST/ACS および WFC3 イメージで可視・近赤外線対応天体も同定されており、測光赤方偏移からこの検出輝線候補は $z = 0.913$ の CO(4-3) 回転遷移輝線である可能性が高い。候補天体の分子ガス質量は $7 \times 10^8 M_\odot$ 、星質量は $1 \times 10^8 M_\odot$ と推定され、非常にガスが豊富な天体であると考えられる。

1 Introduction

近年の研究により、宇宙の星形成率密度が宇宙年齢にわたってどのように変遷してきたかが明らかになりつつある (e.g. Madau & Dickinson 2014)。次のステップとしてその原因を理解するためには星の材料となる分子ガス量の変遷を調べることが不可欠である。これまで行われてきた分子輝線の観測はほかの波長で”pre-selected”された天体で行われたものがほとんどであるが、分子ガス密度の進化を観測的に示すためには無バイアスな探査による分子輝線光度関数の決定が必要である。無バイアスな探査の例として Tamura et al. (2014) では CO 分子輝線銀河の偶然検出に成功しているほか、Walter et al. (2014) では Plateau de Bure Interferometer (PdBI) を用いた CO 無バイアス探査を行い、ガス質量密度の進化にある程度の制限を与えている。しかし、より強い制限を与えるには更なる探査が必要である。

無バイアス探査の一つの手段として近年注目されているのがアーカイブデータを使った探査である。Ono et al. (2014) では Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) のアーカイブデータを用いた解析でサブミリ波帯に強い輝線を持つ天体を検出しているほか、Matsuda et al. in prep では

ALMA アーカイブデータを利用した [CII] 輝線探査を行っている。

本研究ではミリ波分子輝線に着目した無バイアス探査を行い、CO 光度関数に制限を与えている。

2 Data and analysis

2.1 ALMA data

本研究で使用したアーカイブデータは ALMA の初期科学観測 (Cycle 0) として 2012 年 6 月 17 日と 7 月 4 日に行われた Band 6 の連続波観測 (観測周波数 231 GHz) である (PI. Johan Richard)。このデータの広さは 50 視野 (4.7 平方分) にわたり、深さは連続波で $1\sigma = 90 \mu\text{Jy}/\text{beam}$ 、合成ビームサイズは $0.8'' \times 0.6''$ を達成している。

2.2 Data analysis

本研究では上記の ALMA アーカイブデータをデータリダクションパッケージ CASA¹ のタスク CLEAN を用いて再解析し、200 ch (およそ 120 km/s) ピニン

¹<http://casa.nrao.edu>

表 1: 検出候補

No.	R.A. (J2000)	Dec. (J2000)	中心周波数 (GHz)	積分強度 (mJy km/s)	半値幅 (km/s)	200 ch ピニングでの ピーク値の S/N
1	13 ^h 11 ^m 32.77 ^s	-1° 19' 51".26	241.03	894 ± 325	138 ± 38	4.5
2	13 ^h 11 ^m 26.67 ^s	-1° 19' 59".76	239.90	463 ± 195	63 ± 20	4.6
3	13 ^h 11 ^m 27.50 ^s	-1° 21' 23".84	240.68	564 ± 200	80 ± 21	5.2
4	13 ^h 11 ^m 27.04 ^s	-1° 19' 54".67	221.91	565 ± 249	88 ± 29	4.0
5	13 ^h 11 ^m 31.70 ^s	-1° 20' 55".16	222.91	271 ± 110	61 ± 18	5.1

注: 表の数値は 50 ch ピニングのデータで CASA のタスク specfit を用いた Gaussian フィットを行って得られた値である

グと 50 ch (およそ 30 km/s) ピニングの 3 次元データキューブを作成した。

このように作成したデータキューブについて次のような基準を設けて輝線天体の探査を行った。

1. 200 ch ピニングのデータキューブについて CLUMPFIND (Williams, de Geus, & Blitz 1994) を用いてフラックスで密度のピーク値が $\geq 4\sigma$ となるクランプを探す。
2. 1. で見つかったクランプについて、さらに 50 ch ピニングのデータキューブでピークのチャンネルの前後のチャンネルに関しても同じ位置で検出されるか確かめる

本研究では 1., 2. の基準を満たしたものを輝線銀河検出候補として取り扱っている。50 ch ピニングのデータキューブは $1\sigma = 2.5$ mJy/beam である。

3 Results

今回の探査では 5 つの検出候補天体が見つかった (表 1)。しかし、50 ch ピニングでのピーク値が $> 5\sigma$ となるものはなかった。このため、本研究では significant な検出は得られなかったかとして光度関数に上限値を与えるにとどまっている。

4 Discussion

4.1 CO luminosity function

本研究で得られた CO 光度関数の制限と Millennium Simulation をもとにした準解析的モデル S-cubed SAX (Obreschkow et al. 2009) での CO 光度

関数や過去の無バイアス探査 (Walter et al. 2014) の結果と比較する。

ここでは CO の光度は $[Jy km/s Mpc^2]$ を単位として $L^V = 4\pi D_L^2 S^V / (1+z)$ と定義する。 z は赤方偏移、 D_L は光度距離 [Mpc]、 S^V は CO の積分強度 [Jy km/s] である (Obreschkow et al. 2009)。本研究では 50 ch ピニングでのピーク値が $> 5\sigma$ となる検出が得られなかったため、 S^V は CO の輝線プロフィールをピーク値が 3σ 、半値幅がそれぞれ 100, 300, 500, 700 km/s の Gaussian であると仮定して求めた値を使用した。今回の探査で得られた CO 分子輝線銀河の空間密度の上限値は $[Mpc^{-3} dex^{-1}]$ を単位として、 $\phi_{upper\ limit} = (\Delta V_{com} \log_{10} L^V)^{-1}$ を採用した。 ΔV_{com} は共動体積である。

今回利用したのは重力レンズ領域のデータなので、CO の輝線光度や共動体積を求める際には重力レンズによる影響を考慮しなければならない。本研究では Oguri (2010) の重力レンズ効果のモデル glafic を用いて重力レンズの影響を補正した。表 2 では重力レンズの効果も補正して求めた輝線光度などの値をまとめている。

以上によって求めた CO 光度関数をプロットしたのが図 1 である。ここでは luminosity bin として 1 dex を採用している。また CO excitation ladder の不確かさを回避するため、CO 輝線光度を CO(1-0) に変換するといったことは行っていない。図 1 の実線は S-cubed SAX (Obreschkow et al. 2009) から得られたそれぞれの赤方偏移における CO 光度関数で、破線は $z = 0$ における光度関数である。マゼンダの領域は Walter et al. (2014) で得られた値を Dannerbauer et al. (2009) を用いて CO(5-4) に変換したものである。

図 1 で分かるように、今回の探査で得られた値は準解析的なモデルや過去の観測によって得られた光

表 2: CO 輝線光度と空間密度の上限值

Line	z	μ	L_{100}^V (10^8 Jy km/s Mpc 2)	L_{300}^V (10^8 Jy km/s Mpc 2)	L_{500}^V (10^8 Jy km/s Mpc 2)	L_{700}^V (10^8 Jy km/s Mpc 2)	$\phi_{\text{upper limit}}$ (10^{-3} Mpc $^{-3}$ dex $^{-1}$)
CO(3-2)	0.44	4.2	0.095	0.28	0.47	0.66	8.2
CO(4-3)	0.91	4.3	0.42	1.3	2.1	3.0	3.2
CO(5-4)	1.39	4.3	0.98	2.9	4.9	6.9	2.6

注: 2 列目の値は重力レンズによる増光率. 3~6 列目の値はそれぞれ半値幅を 100, 300, 500, 700 km/s としたときの輝線光度

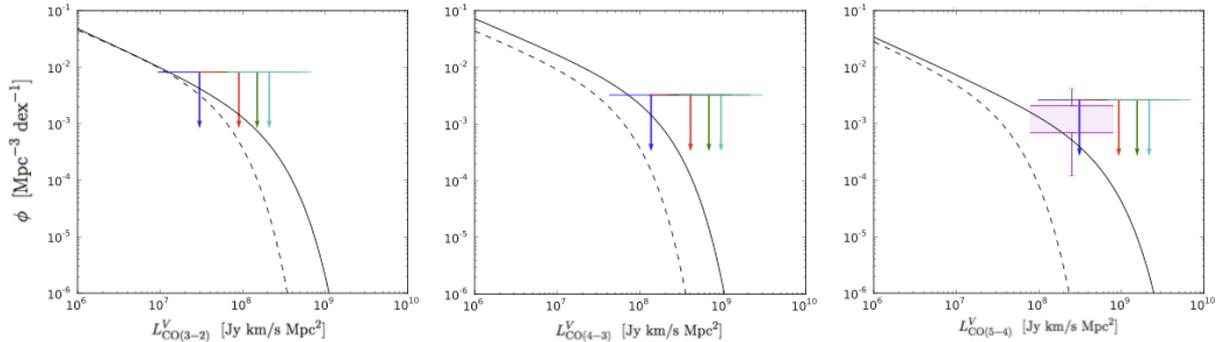


図 1: 左から CO(3-2), CO(4-3), CO(5-4) の光度関数. 実線は S-cubed SAX から得られたそれぞれの赤方偏移における光度関数. 点線は $z = 0$ の光度関数. 青, 赤, 緑, シアンはそれぞれ半値幅を 100, 300, 500, 700 km/s の場合に光度関数に与える制限であり, マゼンダの領域は Walter et al. (2014) によって得られた値である.

度関数と矛盾しないことが分かる. また, 光度関数の“折れ曲がり”に制限を与えることができた. さらに強い制限を与えるためにはより多くのアーカイブデータを解析する必要がある (詳細は Sec.5.2). 以上からアーカイブデータの利用が CO 光度関数を制限するのに有用な手段であることを示すことができた.

4.2 Detection candidate

本研究で見つかった 5 つの候補天体 (表 1) のうち検出候補 No.1 についてはハッブル宇宙望遠鏡 (HST) ACS と WFC3 のデータから対応天体が見つかった. よってここでは No.1 について考察を進めていくことにする. なお, 候補天体 No.1 は 200 ch ピニングでピーク値の S/N は 4.5 を達成している. 50 ch ピニングにおける No.1 のピーク値のチャンネルでの 2 次元マップとスペクトルは図 2 左に示す.

HST 画像を測光し, EAZY (Brammer et al. 2008) を用いて測光赤方偏移を求めると $z_p = 0.897^{+0.095}_{-0.241}$ となった (図 2 右). 画像解析の際には Yagi et al. (2002), Ouchi et al. (2004), Ono et al. (2010) を

参考にした. この結果から, No.1 が真の天体ならば $z = 0.913$ の CO(4-3) 輝線である可能性が高いことが分かった.

さらに近傍の星形成銀河 M82 の CO excitation ladder (Weiss et al. 2005) を仮定し, 換算係数 $\alpha = 0.8 M_{\odot} (\text{K km/s pc}^2)^{-1}$ (Downs & Solomon 1998) とすると, 分子ガス質量は $M_{\text{gas}} \sim 7 \times 10^8 M_{\odot}$ となる. これは M82 と同等の質量である. 一方, 星質量-光度比の関係 (Wilkins et al. 2013) から見積もった星質量は $M_* \sim 1 \times 10^8 M_{\odot}$ 程度である. 分子ガス質量比 $f_{\text{gas}} = M_{\text{gas}} / (M_{\text{gas}} + M_*) \simeq 0.9$ となり, これは $z \sim 1$ の星形成銀河の平均的な値 $f_{\text{gas}} = 0.33$ (Tacconi et al. 2013) よりも非常に大きな値になっている.

この検出候補の真偽を決定するには追加観測が必要になる (詳しくは Sec. 5.2) が, 今回の探査でガスが非常に豊富な天体の候補が見つかったことはこの時代にまだ活発な星形成をしておらず, 従来の観測方法では発見できなかった種族の銀河の存在を示唆するという意味で意義のあるものであるといえる.

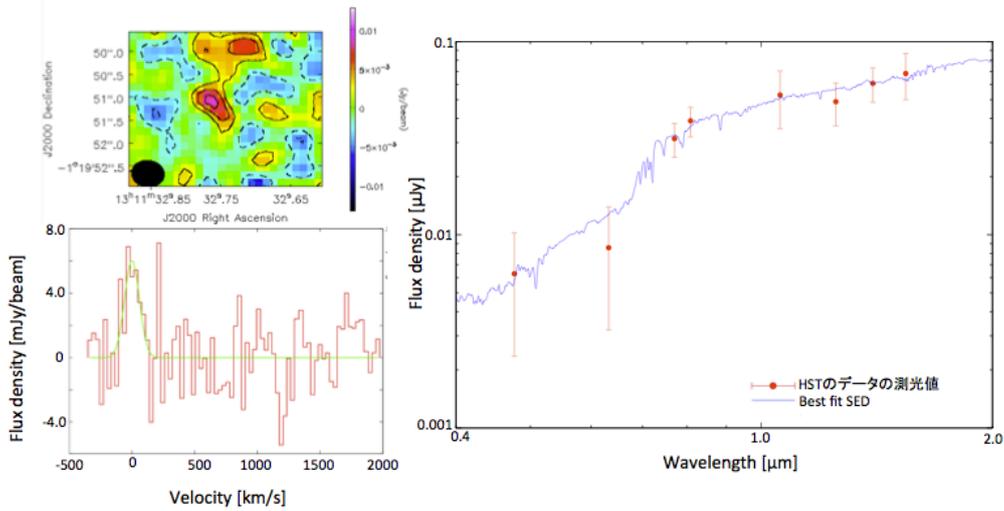


図 2: 左上:50 ch ピニングでのピークチャンネルにおける 2 次元マップ. コントアは 1σ ごと. 左下: No.1 のスペクトル (50 ch ピニングのもの). 緑の線は Gaussian フィット. 右: No.1 の測光値と best fit SED. 赤い点が HST の画像から得られた測光値で青い線が EAZY を用いて得られた best fit SED.

5 Summary & Future work

5.1 Summary

本研究の summary は次の通りである.

- ALMA アーカイブデータを再解析し, 分子輝線銀河探査を行った.
- $> 5\sigma$ の significant な検出が得られなかったため CO 光度関数に上限値の制限を与えた.
- No.1 の検出候補が真の天体ならば No.1 の輝線は $z = 0.913$ の CO(4-3) であり, 非常にガスが豊富な天体である.
- ALMA アーカイブデータの利用が CO 光度関数を制限するのに有用な手段であるとともに, 今までの手法では検出できなかった種族の天体を検出できる可能性があることを示すことができた.

5.2 Future work

今回の探査では CO 光度関数に上限値を与えるにとどまっている. より強い制限を与えるためにはより多くのアーカイブデータを解析する必要がある. その際, 深さと広さどちらに焦点を当てるべきかとい

う問題があるが, S-cubed SAX から見積もると広さに焦点を当てた探査が効率的である.

検出候補 No.1 の追加観測については大気の透過率を考慮すると, 観測周波数 301.30 GHz の CO(5-4) や 257.30 GHz の [CI] が適当だと考えられる. 追加観測ではこれらの輝線を PdBI を用いて観測することを計画中である.

Reference

- Brammer, G. B. et al. 2008 ApJ, 686, 1503
 Bauermeister, A. et al. 2010, ApJ, 717, 323
 Downs, D., & Solomon, PM. 1998 ApJ, 507, 615
 Madau, P., & Dickinson, M. 2014 arXiv:1403.0007v2
 Matsuda, Y. et al. in prep
 Obresckow, D. et al. 2009b, ApJ, 702, 1628
 Ogrui, M. PASJ, 62, 1017
 Ono, Y. et al. 2010, MNRAS, 402, 1580
 Ono, Y. et al. 2014, arXiv:1403.4360
 Ouchi, M. et al., 2004, ApJ, 611, 660
 Tacconi, L. J. et al. 2013, ApJ, 768, 74
 Tamura, Y. et al. 2014, ApJ, 781, L39
 Walter, F. et al. 2014. ApJ, 782, 79
 Wilkins, S. M. et al. 2013, MNRAS, 431, 430
 Williams, J. P. et al. 1994, ApJ, 428, 693
 Yagi, M. et al. 2002, AJ, 123, 66