

## ALMA Calibrator Sources を用いた分子吸収線系探査

安藤 亮 (東京大学 天文学教育研究センター)

### Abstract

遠方のクエーサーを背景光源として、手前に存在する星間物質による分子吸収を生じている分子吸収線系は、星間物質の化学的性質や進化を探索する上での強力なツールである。このうち銀河系内の分子吸収線系観測からは、輝線では検出困難である希薄な星間ガスの物理化学状態が明らかになりつつある。その反面、吸収線の検出には強い背景光源が必要であることから、現在知られている分子吸収線系の数は限られている。新たな分子吸収線系を探索する対象として、我々は過去に ALMA で観測されている膨大な数の位相較正用電波天体 (ALMA Calibrator Source) に着目した。ALMA の高感度・高速度分解能によって、短時間の積分でも何らかの分子吸収線を検出しているケースがあることを期待し、ALMA アーカイブデータに含まれる較正天体 36 個のスペクトル解析を行った。その結果、J1717-337 など 4 天体の方向で銀河系内の星間物質由来の分子吸収線を検出することに成功し、このうち 3 天体は過去に研究されていない新たな銀河系内吸収線系であった。また 2 天体においては HCO ラジカルの吸収線を検出したが、銀河系内の希薄なガスにおける HCO 吸収線は過去に 2 例しか報告されておらず、本研究はそのサンプル数を倍増させた。さらに HCO が PDR (光解離領域) のトレーサーであることから、観測された希薄なガスが PDR 的な環境にあり、何らかの熱源による光解離が生じていることが示唆される。これらの結果は、新たな分子吸収線系を探索する上で、ALMA の較正天体が潜在的な可能性を有するソースであることを示すものである。

## 1 Introduction

分子吸収線系とは、遠方のクエーサーを背景光源として、手前に存在する星間物質による分子吸収を生じている系のことであり、星間物質の化学的性質やその進化を探索する上での強力なツールである。吸収線の深さは背景光源の光度のみに依存し、吸収体までの距離には依存しないことから、吸収線を用いることで輝線よりも高い感度で遠方の星間物質を観測できる場合もある (Wiklind & Combes 1994)。

分子吸収線系の中でも、とりわけ遠方銀河による吸収を生じている系の観測からは、星間物質の化学進化や各種基本定数、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 温度の時間的変動などを、赤方偏移の関数として調べる事が可能である (Combes 2008)。またクエーサー母銀河における分子吸収の観測からは、活動銀河核周辺のガスの構造を明らかにできる (Espada et al. 2010) だけでなく、その存在が仮定されている分子ガスのトラスの直接撮像も期待できる (Okuda et al. 2013)。加えて、銀河系内における分子吸収線の観測では、輝線では観測できない希薄な分子ガ

スの化学的性質や生成過程についての情報を得ることができ、さらに新たな分子の検出につながる可能性もある (e.g. Liszt et al. 2014)。

しかしながら、分子吸収線系には強い背景光源が必要であるため、現在知られている系の数は限られており、特にミリ波帯で遠方で分子吸収を生じている系は 4 天体しか知られていない (Combes 2008)。新たな分子吸収線系の探索には、高感度・高速度分解能を有するクエーサーのスペクトルが必要であることから、本研究では ALMA で過去に観測されている位相較正用電波天体 (ALMA Calibrator Source) に着目した。全ての電波観測において行われる位相較正には一般にクエーサーが用いられており、ALMA の威力によりこのスペクトルに何らかの分子吸収線が検出されている場合があることが期待できる。ALMA アーカイブデータには膨大な数の較正天体のデータが存在していることから、これらをスペクトル解析することによって、新たな分子吸収線系を探索するというのが本研究の趣旨である (本研究の詳細は Ando et al. 2015 に記される)。

表 1: 本研究で分子吸収線を検出した ALMA アーカイブデータの一覧

| プロジェクト         | 観測期間                    | バンド | バンドパス<br>較正天体   | 積分時間<br>(s) | 位相較正天体           | 積分時間<br>(s) |
|----------------|-------------------------|-----|-----------------|-------------|------------------|-------------|
| 2011.0.00217.S | July 29 - August 1 2012 | 3   | <b>NRAO530</b>  | 131         | <b>J1717-337</b> | 107         |
| 2011.0.00351.S | April 7 - July 31 2012  | 3   | J1924-292/3C279 | 421/104     | <b>J1717-337</b> | 333/88      |
| 2011.0.00259.S | May 8 2012              | 3   | 3C279           | 21          | <b>J1625-254</b> | 55          |
| 2011.0.00531.S | March 27 - May 4 2012   | 6   | J1924-292/3C279 | 133/132     | <b>J1625-254</b> | 61/61       |
| 2011.0.00733.S | August 1 2012           | 3   | <b>NRAO530</b>  | 85          | <b>J1604-446</b> | 69          |
|                | June 18 - July 4 2012   | 6   | <b>NRAO530</b>  | 87          | <b>J1604-446</b> | 138         |
| 2011.0.00524.S | January 12 2012         | 7   | J1427-421       | 103         | <b>J1604-446</b> | 239         |

表 2: 本研究で検出した銀河系内分子吸収線系の一覧 (太字は初検出の吸収線系及び分子種)

| 天体名              | 銀河座標<br>( <i>l, b</i> ) | バンド | 速度分解能<br>(km s <sup>-1</sup> ) | RMS<br>(mJy) | 連続波<br>flux (Jy) | 本研究で検出された分子<br>(太字: new-detection)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------|-------------------------|-----|--------------------------------|--------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>J1717-337</b> | (352.7, 2.4)            | 3   | 3.4                            | 3            | 1.4              | <b>c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>(2<sub>(1,2)</sub>-1<sub>(0,1)</sub>)</b> , <b>HCS<sup>+</sup>(2-1)</b> ,<br><b>H<sup>13</sup>CN(1-0)</b> , <b>HCO(1<sub>(0,1)</sub>-0<sub>(0,0)</sub>)</b> ,<br><b>H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(1-0)</b> , <b>HN<sup>13</sup>C(1-0)</b> , <b>C<sub>2</sub>H(1-0)</b> ,<br><b>HCN(1-0)</b> , <b>HCO<sup>+</sup>(1-0)</b> , <b>CS(2-1)</b> |
| <b>J1625-254</b> | (352.1, 16.3)           | 3   | 3.4                            | 7            | 1.3              | <b>c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>(2<sub>(1,2)</sub>-1<sub>(0,1)</sub>)</b> , <b>C<sub>2</sub>H(1-0)</b> , <b>HCN(1-0)</b>                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                  |                         | 6   | 1.3                            | 19           | 0.69             | <b>CO(2-1)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>J1604-446</b> | (335.2, 5.8)            | 3   | 3.4                            | 6            | 0.75             | <b>CS(2-1)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                  |                         | 6   | 1.3                            | 5            | 0.39             | <b>CO(2-1)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                  |                         | 7   | 0.86                           | 17           | 0.60             | <b>CO(3-2)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| NRAO530          | (12.0, 10.8)            | 3   | 3.4                            | 1            | 0.94             | <b>HCO(1<sub>(0,1)</sub>-0<sub>(0,0)</sub>)</b> , <b>H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(1-0)</b> , <b>SiO(2-1)</b> ,<br><b>C<sub>2</sub>H(1-0)</b> , <b>HCN(1-0)</b> , <b>HCO<sup>+</sup>(1-0)</b>                                                                                                                                                                             |
|                  |                         | 6   | 1.3                            | 5            | 0.77             | <b>CO(2-1)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

## 2 Data Analysis

分子吸収線系の探査を目的として、本研究では ALMA の位相較正用電波天体の中から、(a) 2014 年末時点で ALMA アーカイブに公開されている、(b) ALMA Band 3, 6, 7 のいずれかで、連続波のフラックスが 0.2 mJy 以上である、(c) 1MHz 以上の周波数分解能を有する、という条件を満たす天体のうち、36 個を選定しそのスペクトル解析を行った。解析の手順は、データ解析ソフト CASA のタスク CLEAN を用いて較正天体の 3 次元データキューブを作成し、そのスペクトルに吸収線が見られないか確認するというものである。大部分の較正天体のスペクトルは平坦であったが、表 1 に示される 6 つのプロジェクトで観測された 4 天体 (各天体の詳細は表 2 に示す) については、 $3\sigma$  ノイズレベルを超える有意な吸収線の兆候が見られた。

分子吸収線が検出されたスペクトルは、連続波を差し引いた上で同連続波で規格化した。その上で吸収線をガウシアンでフィットし、吸収線の中心速度、深さ、線幅を測定した。これらの測定結果の一部を表 3 に示す。ここから各分子種の光学的厚みと柱密度を

導出したが (導出の詳細は Ando et al. 2015 に記される)、その際に各分子の励起温度 ( $T_{\text{ex}}$ ) を、CMB 温度と等しい 2.73 K と仮定した。この仮定は多くの銀河系内吸収線系の先行研究で用いられており、またフラックス較正の不定性に影響されることなく光学的厚みなどを導出できるという利点を有する。 $T_{\text{ex}}$  の値によって各分子の柱密度も変化するが、その変化率は c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> を除く全ての分子でほぼ同じであることから、各分子の  $T_{\text{ex}}$  が等しいという仮定の下では、次節の議論のように柱密度比をとれば、その不定性は  $T_{\text{ex}}$  にほぼ (10%以下) 依存しなくなる。

## 3 Results and Discussion

本研究では ALMA の位相較正用電波天体 36 個をスペクトル解析し、この内 4 天体で分子吸収線を検出した。各吸収線の視線速度を考慮すると、これらはいずれも銀河系内の星間物質由来であることが示唆される。この 4 天体の内、NRAO530 は多数の研究がなされている銀河系内分子吸収線系であるが、他の 3 天体 (J1717-337, J1625-254, J1604-446) はいずれも過去に知られていない新たな吸収線系である。

表 3: 本研究で新たに検出した分子吸収線のフィッティング結果の一部 (全体は Ando et al. 2015 に記載)

| 天体名       | 分子種                          | 周波数<br>$\nu$ (GHz) | 視線速度<br>$V_{\text{LSR}}$ (km s $^{-1}$ ) | 光学的厚み<br>$\tau_\nu$ | FWHM<br>(km s $^{-1}$ ) | 柱密度<br>$N_{\text{total}}$ (cm $^{-2}$ ) |
|-----------|------------------------------|--------------------|------------------------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| J1717-337 | HCO( $1_{(0,1)}-0_{(0,0)}$ ) | 86.6708            | $-3.03 \pm 0.10$                         | $0.016 \pm 0.002$   | $5.33 \pm 0.23$         | $(2.1 \pm 0.2) \times 10^{12}$          |
|           | H $^{13}$ CO $^+$ (1-0)      | 86.7543            | $-2.64 \pm 0.08$                         | $0.011 \pm 0.002$   | $6.33 \pm 0.21$         | $(8.6 \pm 1.2) \times 10^{10}$          |
|           |                              |                    | $5.78 \pm 0.80$                          | $0.005 \pm 0.002$   | $3.76 \pm 2.16$         | $(2.3 \pm 1.6) \times 10^{10}$          |
|           | C $_2$ H(1-0)                | 87.3169            | $-2.60 \pm 0.09$                         | $0.097 \pm 0.004$   | $5.55 \pm 0.22$         | $(3.7 \pm 0.2) \times 10^{13}$          |
|           |                              |                    | $7.10 \pm 0.33$                          | $0.035 \pm 0.005$   | $4.56 \pm 0.81$         | $(1.1 \pm 0.3) \times 10^{13}$          |
|           |                              |                    | $-20.76 \pm 0.07$                        | $0.024 \pm 0.001$   | $4.39 \pm 0.17$         | $(7.1 \pm 0.5) \times 10^{12}$          |
| NRAO530   | HCO( $1_{(0,1)}-0_{(0,0)}$ ) | 86.6708            | $6.19 \pm 0.18$                          | $0.005 \pm 0.001$   | $5.55 \pm 1.44$         | $(2.8 \pm 0.9) \times 10^{12}$          |

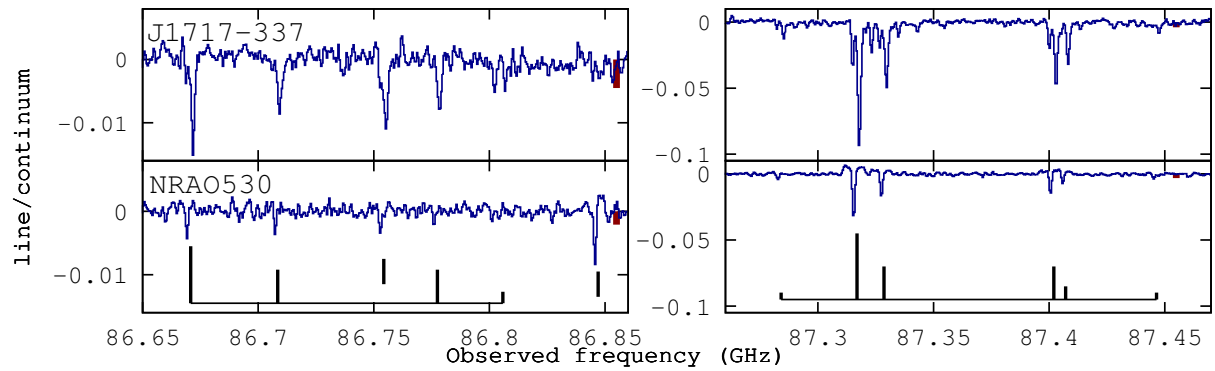


図 1: J1717-337 (上段) 及び NRAO530 方向 (下段) のスペクトル。3 $\sigma$  ノイズレベルを各スペクトルの右上に赤太線で示す (以下同様)。HCO( $1_{(0,1)}-0_{(0,0)}$ ) (左側) と C $_2$ H(1-0) (右側) の超微細構造線の周波数及び固有強度比は、下段下側の黒線で示される。左下のスペクトルには、H $^{13}$ CO $^+$ (1-0) (86.7543 GHz) 及び SiO(2-1) (86.8470 GHz) の周波数も黒線で付記している。

J1717-337 (図 1, 図 2) は銀河系内の中性水素吸収線の検出例はあるが (Dickey et al. 1983)、分子吸収線については過去に報告がなく、本研究で検出した 10 種もの分子種全てが初めての検出である。加えて、HCO( $1_{(0,1)}-0_{(0,0)}$ ) の超微細構造線 4 本と、C $_2$ H(1-0) の超微細構造線 6 本を明確に検出することにも成功した。J1625-254 (図 3) 及び J1604-446 (図 4) に関しては、過去に吸収線が検出された例はなく、表 2 に示される分子全てが初検出である。NRAO530 (図 1) は多くの先行研究がある有名な銀河系内分子吸収線系であるが (e.g. Lucas & Liszt 1996)、HCO ラジカル吸収線を検出したのは本研究が初めてである。

本研究で検出した多くの分子種の中でも、HCO は最も特筆すべきものである。HCO は HII 領域や星形成銀河での輝線観測は複数なされているが、銀河系内の希薄な星間物質における HCO 吸収線を検出した例は、過去に 2 例しか報告されていない (Liszt et al. 2014)。したがって、本研究で検出した J1717-337 及び NRAO530 方向での HCO 吸収線は、史上 3 番

目及び 4 番目の検出であり、本研究は HCO 吸収線のサンプルを倍増させたことになる。

HCO は PDR (光解離領域) のトレーサであることが知られている (Schenewerk et al. 1988)。さらに、H $^{13}$ CO $^+$  に対する HCO の柱密度比は紫外線輻射場の存在を診断する手法として利用することができ、この比がおおよそ 1 以上あれば紫外線による光解離が起こっていることが示唆される (Gerin et al. 2009)。J1717-337 及び NRAO530 方向では、この比がそれぞれ  $25 \pm 4$  及び  $23 \pm 7$  であり、これらの値は複数の PDR における比 (Schilke et al. 2001) に匹敵する。これより上記 2 天体方向に検出された星間物質は、OB 型星などからの紫外線輻射にさらされており、PDR 的な環境下にあることが示唆される。

本研究で 3 つもの新たな銀河系内分子吸収線系を検出できたことから、ALMA の較正天体は分子吸収線系探索を行う上で潜在的な可能性を秘めたソースであることが示唆される。また、較正天体としてのわずかな数分程度の積分時間で、銀河系内における希

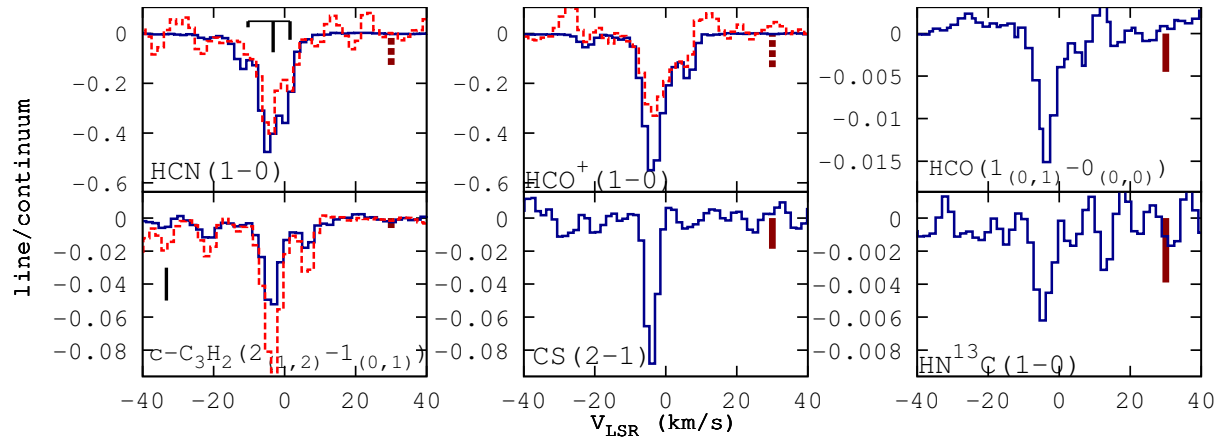


図 2: J1717-337 方向で検出された全分子の吸収線スペクトル。青実線で示される HCN(1-0) 及び HCO<sup>+</sup>(1-0) のスペクトルには、それぞれ H<sup>13</sup>CN(1-0) 及び H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(1-0) のスペクトルを、縦軸方向に 30 倍に拡大して赤破線で重ね書きしている (3 $\sigma$  ノイズレベルも同様に <sup>13</sup>C 同位体種に対応しており、30 倍に拡大している)。c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>(2<sub>(1,2)</sub>-1<sub>(0,1)</sub>) の青実線スペクトルには、C<sub>2</sub>H(1-0) ( $J = 3/2-1/2$ ,  $F = 2-1$ ) のスペクトルを赤破線で重ね書きしており、その横の黒線は HCS<sup>+</sup>(2-1) の周波数を示している。

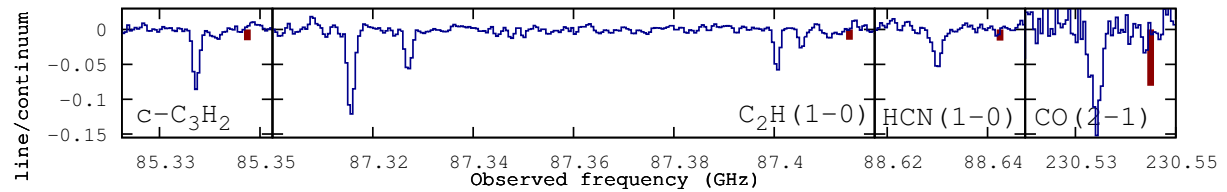


図 3: J1625-254 方向で検出された全分子 (左から c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>(2<sub>(1,2)</sub>-1<sub>(0,1)</sub>), C<sub>2</sub>H(1-0), HCN(1-0), CO(2-1)) のスペクトル

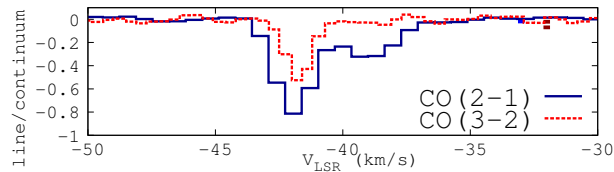


図 4: J1604-446 方向のスペクトル

薄な星間物質での HCO 吸収線サンプルを倍増させたことから、分子吸収線系探索に対する ALMA の威力が示されたと言える。ALMA の較正天体を用いた分子吸収線系探索により検出された系を ALMA によって追観測することにより、銀河系内から遠方宇宙までのあらゆる星間物質の物理・化学的性質をより詳細に明らかにしていくことができると期待できる。

## 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

- Ando, R., Kohno, K., Tamura, Y., Izumi, T., Umehata, H., & Nagai, H. 2015, submitted to PASJ
- Combes, F. 2008, Ap&SS, 313, 321
- Dickey, J. M., Kulkarni, S. R., van Gorkom, J. H., & Heiles, C. E. 1983, ApJS, 53, 591
- Espada, D. et al. 2010, ApJ, 720, 666
- Gerin, M., Goicoechea, J. R., Pety, J., & Hily-Blant, P. 2009, A&A, 494, 977
- Liszt, H. S., Pety, J., Gerin, M., & Lucas, R. 2014, A&A, 564, A64
- Lucas, R., & Liszt, H. S. et al. 1996, A&A, 307, 237
- Okuda, T., Iguchi, S., & Kohno, K. 2013, ApJ, 768, 19
- Schenewerk, M. S., Snyder, L. E., Hollis, J. M., Jewell, P. R., & Ziurys, L. M. 1988, ApJ, 328, 785
- Schilke, P., Pineau des Forêts, G., Walmsley, C. M., & Martín-Pintado, J. 2001, A&A, 372, 291
- Wiklind, T., & Combes, F. 1994, A&A, 286, L9