

小質量星周囲の 円盤における化学

相川 祐理¹・大和 義英¹
Gianni Cataldi²・野津 翔太³

〈¹ 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈² 国立天文台アルマプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈³ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: ¹ aikawa@astron.s.u-tokyo.ac.jp



相川

大和



Cataldi

野津

小質量星の星周円盤は惑星系の形成現場であり、円盤の分子輝線観測は惑星系の形成過程や材料物質の解明に直結する。アルマ望遠鏡では複数のLarge Programをはじめ多くの円盤観測が行われている。本稿ではそのうち(1)光度アウトバースト中の若い円盤と(2)主系列に達しすでに惑星系を持っていると考えられるデブリ円盤について最近の研究を紹介する。

1. はじめに

この特集の目的は、ALMA10周年研究会の講演者が、講演内容を基に各サイエンス分野の現状と進捗を紹介することである。筆者は研究会において低質量星の星周円盤のアストロケミストリーを主題として招待講演を行った。サイエンスセッションの一番最初の講演ということもあり、講演の前半では筆者がco-PIを務めたALMA Large Program MAPS (Molecules with ALMA at Planet-forming Scales) の観測結果を中心に、Class II円盤の輝線観測について理論的研究も含めたレビューを行った。このレビューは、2022年5月号の天文月報に古家健次氏らとともに書いた解説記事 [1] と内容が重複する。そこで本稿では、講演後半に発表した光度アウトバースト天体とデブリ円盤の輝線観測 [2, 3] について解説する。

2. 光度アウトバースト天体 V883 Oriで探る円盤氷組成

惑星系は、原始惑星系円盤内において固体ダストの合体成長、集積によって形成される。よって円盤内の固体物質の化学組成は、惑星系の化学的初期条件や形成過程を理解するうえで重要である。揮発性物質が凝縮した氷の分子組成や同位体比は、太陽系の彗星等との比較においても注目されている。通常、氷の組成は、各氷分子に特有の振動遷移を星などの背景光に対する吸収バンドとして観測することで調べられる。振動遷移は赤外波長域にあり、円盤内の氷については現在、JWST (ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡) を用いた観測が試みられている。しかし、ガス輝線に比べて吸収バンドは形が滑らかで分子特定性が劣り、また吸収の深さを測定するための連続波の推定も円盤をもつ天体では一意には決まらな

いった難しさがある。そこで、何らかのメカニズム*1で温度が急激に上昇した円盤において、氷から昇華したの分子をアルマ望遠鏡で観測するという裏技が近年注目されている(図1)。

V883 Oriはオリオン座の星形成領域(距離約400 pc)にあるFU Ori型星*2である。約 $1.3 M_{\odot}$ の低質量原始星(Class I)であるが、円盤も含む系全体の光度は約 $200 L_{\odot}$ と非常に高い。原始惑星系円盤では、中心面においてダスト温度が水氷の昇華温度(~ 150 K)に等しくなる半径を H_2O スノーラインと呼ぶ。普通の円盤では H_2O スノーラインは1 au程度であるが、V883 Oriの H_2O スノーラインは以下の観測から40-80 auと推定されている(図1)。Lucas A. Cieza氏らはV883 Oriをアルマ望遠鏡で観測して、半径40 auを境に内側でダストの光学的厚さが急激に高くなっていることを発見し(図2a)、内側では氷が昇華することでダストの光学特性が変化していると結論づけた[4]。水と同程度の昇華温度を持つ CH_3OH などの大型有機分子輝線はJeong-Eun Lee氏らによって観測された[6]。大型有機分子の輝線は半径100 au程度まで広がっているが、これは円盤上層が中心面よりも温かいためと考えられる(図1)。その後John J. Tobin氏らはHDOと $H_2^{18}O$

輝線を検出し、これらの分子の柱密度分布の推定から H_2O スノーラインを80 auとした[5]。

統計的な観測から、FU Ori型星の増光期間は100年程度と推定されており、これは円盤ガス中での気相反応の典型的な時間スケールよりも十分に短い。よってV883 Oriの H_2O スノーライン近傍で観測されるガス分子は増光前の円盤氷の組成を反映していると考えられる。例えば、HDO、 $H_2^{18}O$ 観測から推定されたHDO/ H_2O の存在比は約 2×10^{-3} で、太陽系の彗星の値($\sim 3 \times 10^{-4} - 10^{-3}$)の上限に近く、若い原始星(Class 0)周囲での観測値と似ている。このことからV883 Ori円盤内の水氷は星間空間から取り込まれてからあまり変化していないと考えられる[5]。

図2(b, c)にアルマ望遠鏡のBand 6(波長 ~ 1.3 mm)で観測したHDOおよび CH_3OH 輝線の強度分布を示す。どちらも放射は0.2秒角(80 au)程度まで広がり、円盤中心領域で弱くなっている。分子輝線の強度が円盤中心部分で弱くなることは他の円盤の分子輝線観測でもよく見られる現象で、多くの場合はダストの光学的厚さが原因と考えられる。輝線のデータ解析では、ダスト連続波の強度を差し引くので、連続波が光学的に厚かつ分子輝線および連続波の放射領域の温度が同

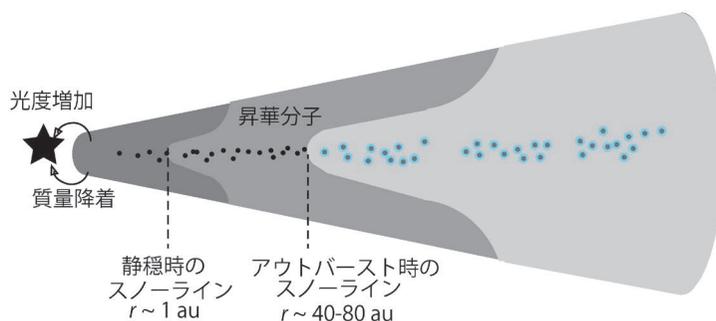


図1 円盤の温度分布とスノーライン。スノーラインの外側ではダスト表面は氷(青色)におおわれている。

*1 円盤内の不安定性によって円盤から中心星への質量降着が増加していると推定される。重力エネルギーの解放によって、中心星の光度が上昇するだけでなく円盤内部での降着加熱によっても円盤温度が上昇する。

*2 太陽程度の質量の前主系列星にはさまざまな光度変動が観測されており、増光の振幅や期間などにしたがって代表的な天体からとった名前が付けられている。FU Ori型星は100倍程度の光度増加が観測された天体である。

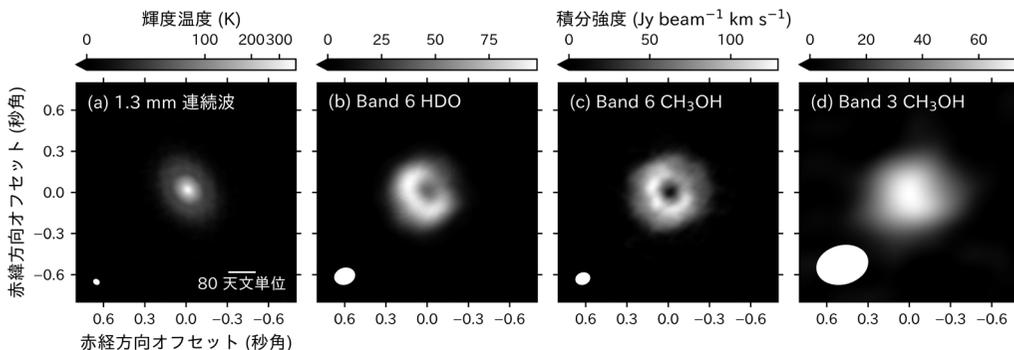


図2 アルマ望遠鏡で観測されたV883 Ori円盤の1.3 mm連続波 (a), Band 6のHDO輝線 (b) およびCH₃OH輝線 (c), Band 3のCH₃OH輝線 (d) の強度分布. 各パネル左下の楕円はそれぞれの観測分解能 (ビーム) を示し, (a) の右下には80 auに対応するスケールバーを表示している. (a) (d) は[2, 4] のアーカイブデータ, (b) (c) は [5] の公開データから作成.

程度である場合、分子輝線の強度は低くなってしまふのである。

では、H₂Oスノーライン内側に相当する円盤中心部分の組成を調べるにはどうしたらよieldろうか？ダストの光学的厚さは、観測波長とともに減少するので、より長波長で観測することが一つの解決策となると考えられる。そこで我々はアルマ望遠鏡のBand 3 (波長 ~3 mm) でV883 Oriを観測し (project code: 2021.1.00357.S, PI: 野津翔太), 得られた有機分子輝線放射の観測結果を論文にまとめた [2]。図2(d) にBand 3のCH₃OH輝線強度分布を示す。輝線強度は中心集中しており、Band 6で見えなかった中心領域からの放射がとらえられているように見えるが、これは空間分解能が低いためかもしれない。より詳細に放射強度分布を調べるため、輝線プロファイルの解析を行った (図3上)。V883 Ori円盤はケプラー回転していることがCOなどの観測で確かめられている。ケプラー回転の速い中心領域からの放射は、輝線プロファイルでは高速度なウィング領域に現われるので、速度分解能と感度が十分にあれば、直接空間分解できる領域よりも内側の輝線強

度分布を推定できるのである。図3 (下) に結果を示す。Band 3で得られた有機分子の輝線強度は円盤中心で弱くなっており、その分布は、不定性は大きいもののBand 6でのCH₃OHの強度分布とよく似ている。このことは、V883 Oriの円盤中心部分でダストの光学的厚さが急勾配で増加し、Band 3の波長帯でも光学的に厚くなっている、もしくは何らかの原因*3で中心領域で水や有機分子が破壊されていることを示唆する。今後は、Band 1などより長波長での高空間分解能および高周波数分解能の観測が必要であろう。

Band 3の観測では多数の有機分子の輝線が検出された。1つの分子について複数の遷移が検出されている場合も多く、これらを同時に輝線モデルでフィットすることで励起温度と柱密度 (光学的厚さ) を推定した。励起温度は約107 Kであり、有機分子の昇華温度と整合的である。検出された様々な有機分子についてCH₃OHとの柱密度比を計算した結果を図4 (上) に示す。CH₃OHは、原始星コアなどにおいて観測される6原子以上からなる大型有機分子の中で最も存在量が多く、理論的には他の有機分子を生成する材料にもなるた

*3 例えば、中心星やその近傍からの強いX線・紫外線放射が円盤内縁の水や有機分子を破壊している可能性などが議論されている [7]。

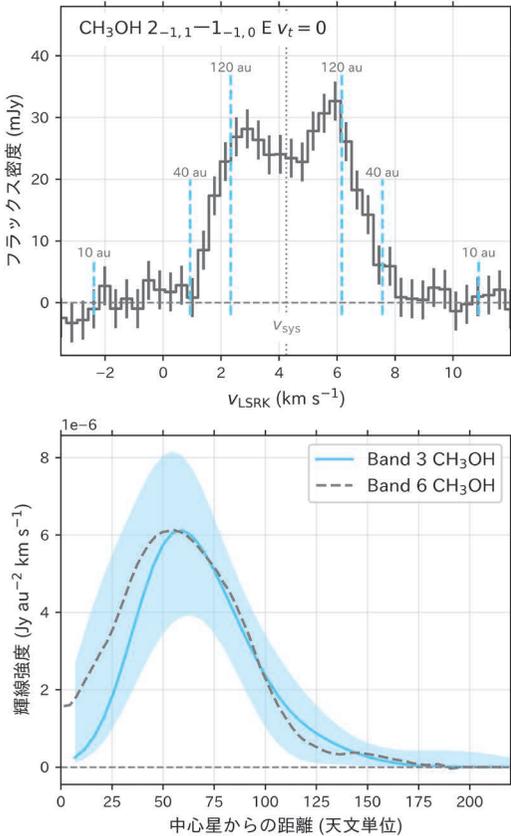


図3 (上) Band 3 CH₃OH輝線のプロファイル。ケプラー回転速度に基づく各速度チャンネルでの対応する円盤半径、および円盤のシステム速度 (v_{sys}) を縦破線および縦点線でそれぞれ示している。(下) 輝線のプロファイルから推定された輝線強度の半径分布。比較のため、積分強度図から得られた Band 6 CH₃OH輝線の半径分布を破線で示している。

め、大型有機分子同士の存在度を比較する際に基準として用いられる。V883 Oriでの大型有機分子とCH₃OHの柱密度比は、原始星コアの代表的な天体である IRAS 16293-2422での値より高く、ロゼッタミッションで探査されたチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星での上限値*4と同程度である。

また、本観測では炭素同位体¹³Cを含む有機分

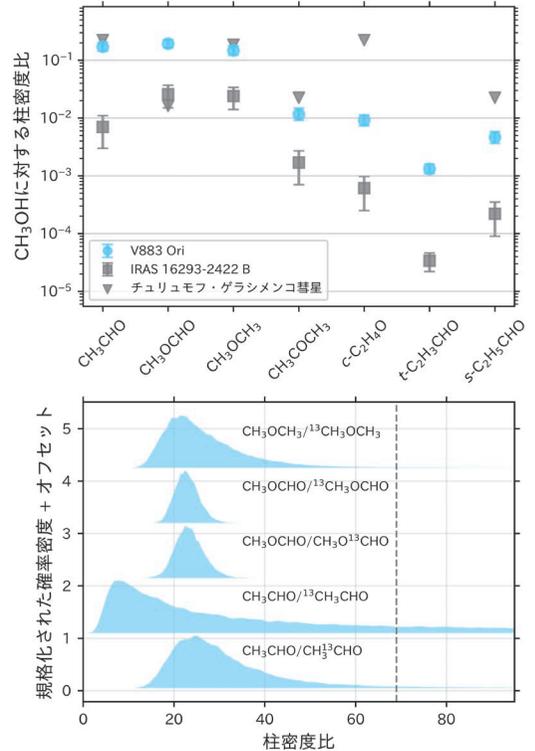


図4 (上) 大型有機分子のCH₃OHに対する柱密度比の比較。本研究で得られたV883 Oriでの値を青丸で、代表的な原始星コアIRAS 16293-2422 Bでの値を四角で、チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星での値(上限値)を三角で示してある。(下) 大型有機分子の¹²C/¹³C比。各¹³Cを含む分子種の¹²C/¹³C柱密度比について、規格化された確率密度関数を示してある。縦破線は太陽系近傍の星間物質における¹²C/¹³C元素組成比(〜69)を示す。

子も検出され、有機分子の¹²C/¹³C比(ここでは¹²Cをもつ分子と¹³Cをもつ分子の柱密度の比とする)が星間物質の元素比である69よりも低い、すなわち有機分子が¹³Cに富むこともわかった(図4下)。理論的研究では、炭素の同位体分別は低温下での同位体交換反応¹³C⁺+CO ⇌ C⁺+¹³COによって進むと考えられており、分子雲の

*4 ロゼッタミッションでは質量分析によって分子同定が行われた。ここで挙げた分子と同じ質量の分子は検出されているが、同質量の異性体の合計の存在量しかわからないので図4では上限値としている。

観測ではCOがやや ^{13}C に富み、その他の分子が ^{12}C に富むことが知られている [8]. 一方, Class II 天体である TW Hya の円盤観測では, 円盤の一部の領域で $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比が21程度になっていることが輝線ウィングの解析によって示された [9]. 通常はCOは炭素を最も多く担う分子なので, その同位体比は元素比から大きくずれることができない. しかし円盤内では, 氷水を氷マントルとしてまとったダスト粒子が円盤中心面に沈殿し, さらに成長とともに半径方向に落下することで, 水を主要キャリアとする酸素が減少し, ガスの元素組成がC/O比 >1 となる場合があると考えられている ([1] 参照). このとき, COは必ずしも最も多くの炭素を担う分子ではなくなるので, $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ 比は元素組成から大きく変化できるようになる. 本研究で見つかった ^{13}C に富む有機分子は, このような環境でできた ^{13}C に富むCOからダスト表面反応や気相反応を経て形成された可能性がある. 有機分子の高い存在度と低い $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は, 分子雲から円盤内に取り込まれた有機分子に加え, 円盤内でも有機分子が生成されていることを示唆する.

V883 Ori については, 現在も ALMA Large Program COMPASS (Complex Organic Molecules in Protostars with ALMA Spectral Surveys)

での観測などが続いている. また, Cycle 10では彗星観測の Large Program も行われている. 今後, V883 Ori と彗星でさらに多くの大型有機分子の存在度や同位体比の比較が可能となるであろう.

3. デブリ円盤

デブリ円盤とは, 主系列星周囲においてダスト連続波で観測される光学的に薄い円盤である. 系外惑星系での天体衝突現象によってまき散らされたダストが熱輻射や中心星の散乱光によって観測されていると考えられるので, デブリつまり残骸と呼ばれている. デブリ円盤は原始惑星系円盤に比べてダスト連続波で1桁程度以上暗いので, アルマ望遠鏡の高感度観測が威力を発揮する天体である. Cycle 9ではデブリ円盤を観測対象とする初の Large Program ARKS (The ALMA survey to Resolve exoKuiper belt Substructures) が採択, 実行されており, 研究会ではその結果速報も行われた.

従来, デブリ円盤にはガスは存在しないと考えられていたが, 近年複数の円盤でCOやC原子の輝線が検出されている. 例として図5に49 Cetiでのダスト連続波, CO, C原子の積分強度図 [10] を示す. 統計的には, 特に若いA型星でガスの検出率が高いことが知られている. ガスの起源とし

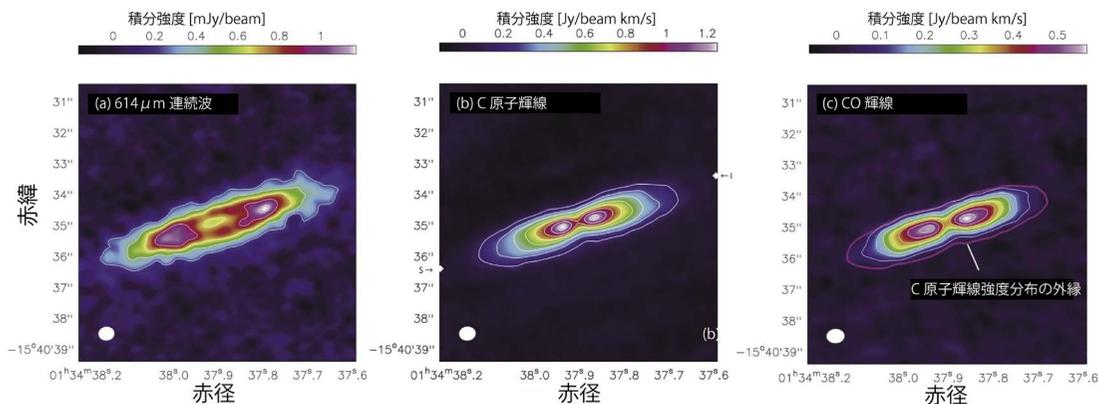


図5 デブリ円盤49 Cetiのダスト熱輻射 (a), C原子輝線 (b), CO輝線 (c) の積分強度図 (ウェブ版ではカラー表示) [10]. 各パネル左下の楕円はそれぞれの観測分解能 (ビーム) を示す.

ては2つの説がある。まず1つ目の説は、彗星状の天体の衝突によりダストとともにガスも供給されているというものである。これは従来からのデブリ円盤の描像に沿ったものである。以降これを二次起源説と呼ぶ。もう1つの説は、原始惑星系円盤ガスの生き残り説である。惑星系形成の研究では、円盤ガスは 10^7 年程度で失われると考えられている。しかしこの推定は、実はガスではなく、ダストによる赤外超過の減少に基づいている。円盤ガスの主成分である H_2 は100 K以下では輝線を放射せず、円盤ガスの総質量や空間分布の推定は原始惑星系円盤の観測的研究において最も難しい問題の1つである [1]。最近の円盤ガス散逸の理論的研究では、A型星は円盤ガスの光蒸発を引き起こす極端紫外線やX線フラックスが小さく、中心星が他のスペクトル型である場合に比べてガスが長時間残る可能性も指摘されている [11, 12]。

樋口あや氏らは、デブリ円盤がPDR*⁵と似ていることに着目し、COとC原子の存在度比がこの2つの説を見分ける指標となりうることを示した [13]。デブリ円盤ではダストが紫外線波長でも光学的に薄いので、星間紫外線や中心星の紫外線によって分子や原子が光解離、電離されている。

星間空間のPDRとの最も大きな違いは、金属量、すなわち重元素と水素分子の存在度比である。デブリ円盤が原始惑星系円盤の生き残りであれば、金属量は太陽元素存在度と同じで、水素分子が豊富に存在する。この場合、C原子は H_2 との反応を経て再びCO分子を生成する(図6右)。二次起源説の場合、 H_2 分子は少ないのでCOの再生効率とCO/C原子比が低くなることが予想される。岩崎一成氏は、このアイデアをより詳細に定量化した [14]。定常PDRモデルを計算する公開コードMeudon codeを、デブリ円盤に適したダストサイズ等が扱えるように改変し、金属量やCO柱密度の関数としてCO/C原子比を求めた。図6(左)はモデル計算から得られた、 H_2 がない場合の主要な反応を示す。計算結果を実際の天体に適用すると、例えば49 Cetiについては、金属量が太陽元素存在度程度であれば定常PDRモデルでCOおよびC原子柱密度を説明できるが、金属量が10倍以上高い場合は定常モデルではCO柱密度が観測値より低くなることが示された。つまり、生き残り説でも二次起源説でもよいが、後者の場合は定常状態ではなく一時的な衝突によるガス生成を見ていることになる。

観測においては、Gianni Cataldi氏が2021年

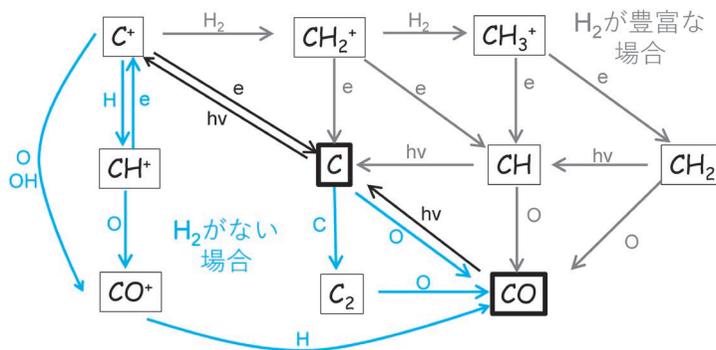


図6 H_2 が豊富な場合(右)とない場合(左)の気相化学反応ネットワーク [13, 14].

*⁵ 星間紫外線や大質量星からの紫外線にさらされた分子雲の表面に生じる Photon-Dominated Region または Photo-Dissociation Region の略称。PDRの温度構造や化学組成分布については、80年代から理論的研究が進められており、定常状態を仮定したモデルがよく知られている。

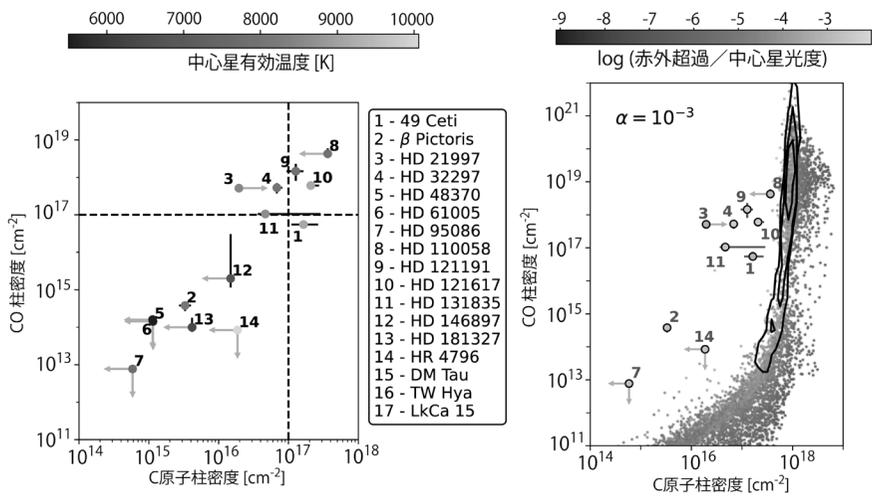


図7 デブリ円盤でのCOおよびC原子ガスの柱密度 (左) および二次起源モデルとの比較 (右)。左図の破線はCO分子を解離する紫外線の遮蔽に必要な柱密度を示す。二次起源モデル [15] はA型星周囲の円盤を想定しているため、右図においては観測から推定した柱密度もA型星の値のみ示す。

9月の段階でALMAアーカイブにCOとC原子の輝線観測データが揃っていたすべてのデブリ円盤について、簡単な円盤モデルを仮定してCOとC原子ガスの柱密度を推定した [3]。その結果を図7 (左) に示す。横および縦の破線は、紫外線に対してCOの自己遮蔽およびC原子によるCOの遮蔽に必要な柱密度 (ともに約10¹⁷ cm⁻²) を示す。紫外線遮蔽の効くガスの豊富な円盤と、ガス柱密度が遮蔽に不十分な円盤の2種類に大別できること、ガスの豊富な円盤はA型星に付随していることがわかる。一方で、A型星の円盤でガスの少ないものもある。各天体の観測結果を岩崎氏らのモデル [14] と比較したところ、HD 131835については上記の49 Cetiと類似の結果が得られた。一方、HD 121191やHD 11058については金属量に関わらず定常PDRと整合的であった。また、二次起源説との比較も行った (図7右)。観測されたCO柱密度は二次起源円盤の population synthesisモデル [15] (図中のドット) と同程度であるが、C原子柱密度はモデルの値よりも1-2桁程度低い。このモデルは、定常状態を仮定せず粘性降着によるガス分布の進化を時間発展で解く

などの点ではPDRモデルよりも詳細であるが、C原子からCOが再生成される化学反応は含まれていない。デブリ円盤ガスが二次起源の場合、そのガスの組成や存在量は系外惑星系での彗星状天体の組成や天体衝突率を探る手がかりとなる。今後、二次起源円盤モデルにも化学反応の効果を取り込んでいく必要がある。

謝辞

原稿に対して有益なご指摘とコメントを下さいました岩崎一成氏に感謝致します。本研究はALMA共同科学研究事業 (2019-13B), 学術変革領域研究 (A) 「次世代アストロケミストリー」 (20H05844, 20H05847), RIKEN Pioneering Project: Evolution of Matter in the Universe (r-EMU), およびJSPS科研費 (23KJ0636, 23KJ0329, 23K13155) の支援を受けています。

参考文献

[1] 古家健次, 大和義英, Cataldi, Gianni, 相川祐理, 2022, 天文月報, 115, 305
 [2] Yamato, Y., et al., 2024, AJ, 167, 66
 [3] Cataldi, G., et al., 2023, ApJ, 951, 111

- [4] Cieza, L. A., et al., 2016, *Nature*, 535, 258
- [5] Tobin, J. J., et al., 2023, *Nature*, 615, 227
- [6] Lee, J.-E., et al., 2019, *Nature Astronomy*, 3, 314
- [7] Notsu, S., et al., 2021, *A&A*, 650, A180
- [8] Furuya, K., et al., 2011, *ApJ*, 731, 38
- [9] Yoshida, T. C., et al., 2022, *ApJ*, 932, 126
- [10] Higuchi, A. E., et al., 2019, *ApJ*, 883, 180
- [11] Nakatani, R., et al., 2021, *ApJ*, 915, 90
- [12] Nakatani, R., et al., 2023, *ApJ*, 959, L28
- [13] Higuchi, A. E., et al., 2017, *ApJ*, 839, L14
- [14] Iwasaki, K., et al., 2023, *ApJ*, 950, 36
- [15] Marino, S., et al., 2020, *MNRAS*, 492, 4409

Astrochemistry in Disks around Low-Mass Stars

Yuri AIKAWA¹, Yoshihide YAMATO¹, Gianni CATALDI² and Shota NOTSU³

¹*Department of Astronomy, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

²*National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

³*Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: The circumstellar disks of low-mass young stellar objects are the site of planetary-system formation. ALMA observations of molecular emission lines in these disks, including several Large Programs, play a key role in elucidating the formation process of planetary systems and chemical composition of their raw material. This article introduces recent studies on (1) young disks undergoing luminosity outbursts and (2) debris disks around relatively young main sequence stars.