

# 宇宙総合学研究ユニット

## NEWS 2023年5月号



## 2023年度宇宙倫理学教育プログラム(SEEP)が 新メンバーとともに始動！

京都大学宇宙総合学研究ユニットで実施される「宇宙倫理学教育プログラム」(SEEP)の各科目が4月から開講されました。今年度も大学内外から多くの方が御応募くださり、昨年度採用された13名(うち学内コース10名、一般コース3名)の方々に加え、学部コース3名、大学院コース1名、一般コース1名の受講者が新たにプログラムに加わりました。受講生は必修科目(宇宙倫理学入門、宇宙総合学/宇宙学、倫理学講義、宇宙倫理学演習、宇宙倫理学ゼミ)および選択科目を履修し、各自で設定したテーマに沿って研究を進めていきます。最終的には研究の成果報告を行うことで、受講生にはプログラム修了証が発行されます。そして早速、基幹講義である「宇宙倫理学入門」および「宇宙倫理学ゼミ」(宇宙ユニット提供科目)が4月17日から始まっています。初回から、立場や年齢の違いもなんのその、少人数ならではのコアで熱い議論が交わされています。

### SEEPの受講生を紹介します！

今年度の受講生紹介第1弾として、SEEP2年目の渡邊智也さんに自己紹介文を寄稿して頂きました！

**渡邊智也 さん**

**(京都大学文学部現代史学専修3回生)**

こんにちは。はじめまして。この度、新年度初回の受講生紹介をすることになりました、京都大学文学部3回生の渡邊智也です。SEEPに参加するのは2年目になります。以下では、①僕のSEEP参加の経緯・これまで何をしてきたか、②SEEPでこれから何をしたいか、の2点についてお話しします。

僕のSEEP参加の動機は、「面白そうだったから」です。直感です。2021年度の春休みに申し込みの期限ギリギリに受講者募集のお知らせを見て、慌てて受講希望書を作成したと記憶しています。申し込みの段階では具体的に何をしたいかは決まっておらず、フワフワした気持ちで顔合わ

せに参加しました。ところが予想以上に理系の方が多く、多少のプレッシャーを感じましたが、心配は杞憂でした。参加者の方の発表は専門外の自分にも理解しやすいように工夫が為されていて、ゼミ後は宇宙のことで頭がいっぱいになっていました。そろそろ自分の話をすると、僕が関心を持っているのは歴史と思想の分野です（専門は歴史学）。後期の発表では、「二次大戦中の日本とドイツにおける科学技術研究の在り方」についてお話ししました。現代の問題とも重なる重要なテーマなのですが、自分の考えていることを他人が理解できるように伝えることは非常に難しく、「翻訳」作業に未だに苦労しています。しかしこの経験は、自分の頭を整理する格好の機会、言語化能力を育てるきっかけになって非常に有意義です。

参加2年目の今年は、何よりも成果物を仕上げねばなりません。現段階で概ねの方向性と枠組みは固まっているので、あとはどれだけフカボリが出来るかにかかっています。善処します。こう言うては何ですが、今年は他の受講生の方の発表にも更に耳を澄ませたいと考えています。今年度の顔合わせが4月の中旬にありましたが、皆さんの自己紹介がとても興味深かったのです。研究室に配属されたので忙しさは増しますが、余裕がある時には他の受講生の方と学内外で交流したいな、とも考えています。5月病の雰囲気を感じていますが（本文を5月2日に打ち込んでいます）、残り約1年間SEEPを楽しく受講したいです。

## 第2回 宇宙学セミナー

# 分子マーカーで捉える原始星円盤形成領域のガス運動

大屋 瑤子 講師（京都大学基礎物理学研究所）

星・惑星系形成の研究において、惑星系の母体となるガス円盤の形成は重要な段階の一つである。本研究では、電波領域での分子輝線観測によって、円盤形成の初期にある若い低質量原始星天体でのガス運動を解析した。ガスの比角運動量を定量的に比較した結果、円盤形成に伴って噴出するアウトフロー構造が、この天体内での角運動量の再分配の役割を担っている可能性が見出された。このことは、この天体での原始星の成長とその周りでの物理構造形成の理解に迫る手がかりを与える。本記事の内容は、二編の学術論文[8, 9]として報告した成果のうち、ガス運動に関する部分を抜粋してまとめ直したものである。

### 背景

太陽程度の質量をもつ恒星（低質量星）は、星間ガスが自己重力で収縮してできる。この過程で、原始星の周りには回転するガスの円盤（原始星円盤/原始惑星系円盤）がつくられ、それを母体として惑星系がつくられると考えられている（図1）。降着ガスから円盤構造が形成される段階では、アウトフローと呼ばれるガス流が天体の外に向かって噴き出す。回転するガスは遠心力によって支えられているが、

角運動量を失うことで原始星に降着し、原始星の成長を促すと考えられている。回転ガス円盤から角運動量を抜き出すメカニズムの候補の一つとしてアウトフローが考えられており、降着ガス・回転円盤・アウトフローの間での角運動量分配は、星・惑星系の構造形成を理解するための重要なトピックである。

円盤とアウトフローの形成過程については、これまでシミュレーション研究が活発に行われてきた。一方で、円盤形成領域が高密度ガスに深く埋もれていることや、高い解像度 (<1") が必要なことから、観測に基づく現象論的なアプローチとしての理解は長らく手付かずで残されてきた。近年、国際共同大型電波干渉計アルマ (ALMA; Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) の登場などにより、このミッシングリンクを繋げるための観測的研究が可能になりつつある。

## 観測結果と議論

IRAS 16293–2422 Source A は ( $d \sim 140$  pc [1])、へびつかい座にある Class 0 低質量原始星天体である (図 2 左)。この天体は、少なくとも二つの原始星 (原始星 A1, A2) からなる連星系である [5]。この天体を取り巻く降着エンベロープガスからその内側の原始星円盤にかけて、ガスの化学組成が急激に変化する現象を以前に報告した [6]。この性質を分子マーカーとして利用することで、ガス構造を選択的に捉える化学診断が可能である [10]。本研究では、ALMA による分子輝線観測により、この天体を取り巻く降着エンベロープガス、回転する原始星円盤、およびアウトフロー構造を、それぞれ別の分子マーカーで捉えた (図 2, 3)。

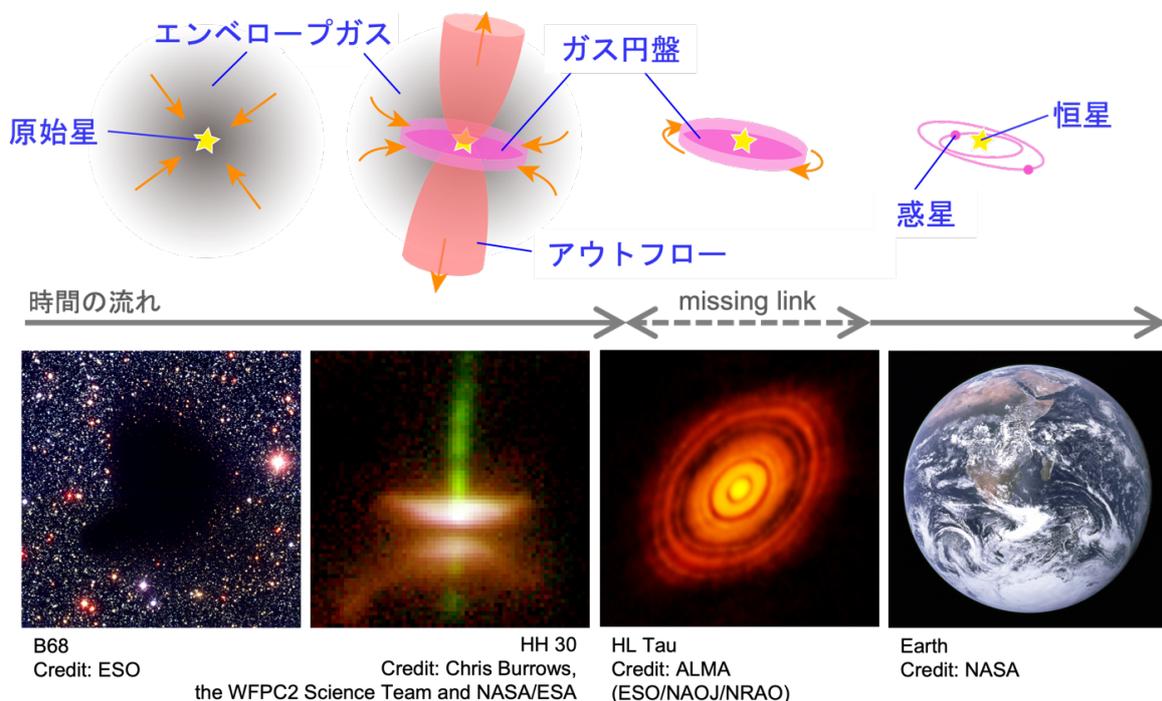


図 1: 低質量原始星の形成過程の概念図。降着するエンベロープガスから、「いつ」「どのようにして」原始星円盤が形成されるのかの理解がミッシングリンクになっている。

Source A 全体を取り巻く降着エンベロープガスは、 $C^{17}O$  分子輝線で捉えられた (図 2 左, 中)。この周連星系降着ガスの速度構造は、角運動量を保存して回転しながら落下するガス円盤のモデル [11] で再現されることがわかった。降着ガスの近星点は半径 50 au と見積もられ、それより内側には  $C^{17}O$  分子輝線の放射は検出されなかった。この近星点の内側では、原始星 A1 に付随した原始星円盤が、 $H_2CS$  分子輝線で捉えられた (図 2 右)。この星周円盤の速度構造は、ケプラー回転するガス円盤のモデルで再現された。

連星系 Source A からは二対の双極アウトフローが噴き出していることが知られている [2]。本研究ではその内、北西-南東方向に伸びるアウトフローが、 $SO$  分子輝線によって捉えられた (図 3)。分子ガスの速度場には、アウトフローの軸と直交する方向に沿った速度勾配が検出された。この結果はアウトフロー構造が軸周りで回転していることを示唆し、その向きは円盤/エンベロープ構造の回転運動の向きと一致する。 $SO$  分子輝線のスペクトルをガウシアンフィットし、ガスの回転速度を算出した。

上記の三つのガス構造 (周連星系降着ガス, 星周円盤, アウトフロー) について、それぞれガスの比角運動量を見積もった (表 1)。その結果、アウトフローがもつ比角運動量は、周連星系降着ガスでの値より小さく、星周円盤での値より大きいことがわかった。 $SO$  分子輝線の分布の様子から、アウトフロー構造の根本は原始星 A2 からは離れており、周連星系降着ガスまたは原始星 A1 の星周円盤に付随していると考えられる。もし、このアウトフロー構造が原始星 A1 の星周円盤上で駆動される円盤風様のものである場合、円盤中のガスの角運動量を抜き取る機構として働くことができる。このことは、原始星へのガス降着を引き起こし、この若い天体での原始星の成長を促している可能性がある。

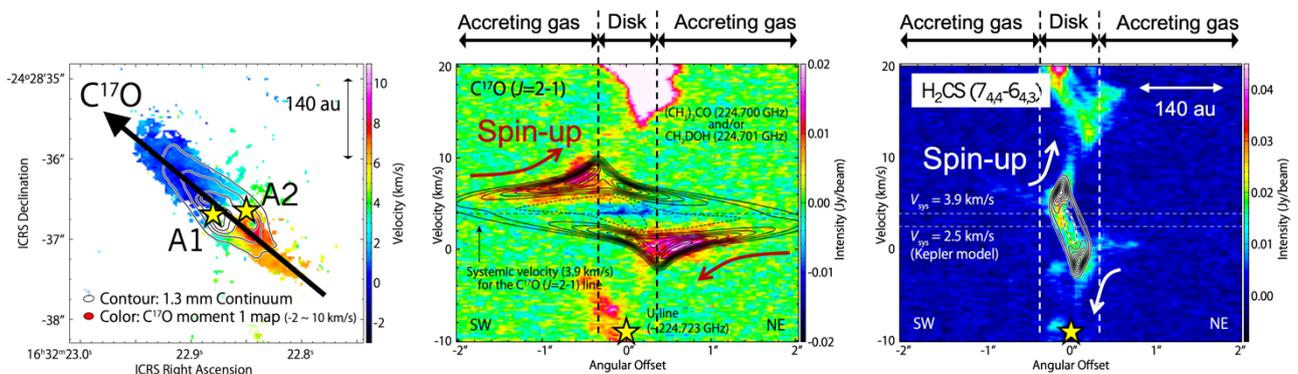


図 2: 低質量原始星連星 IRAS 16293-2422 Source A の ALMA による観測結果 [8]。(左)  $C^{17}O$  分子輝線の速度場の図 (カラー)。等高線は波長 1.3 mm の連続波の分布を表す。北東-南西方向に沿って伸びるガス円盤が検出されており、その赤道面に沿ってガスの運動に速度勾配がみられる。(中)  $C^{17}O$  分子輝線の位置-速度図 (カラー)。横軸は、円盤状構造の赤道面に沿った位置を表す (左図中の矢印)。等高線は、角運動量を保存しながら回転・落下するガス円盤のモデルを表す。Source A 全体を取り巻いて半径 300 au ( $\sim 2''$ ) に広がる周連星系降着ガスの運動が捉えられている。(右)  $H_2CS$  分子輝線の位置-速度図 (カラー)。横軸は、円盤状構造の赤道面に沿い、原始星 A1 を通る位置を表す (左図中の矢印と平行)。等高線は、ケプラー回転円盤のモデルを表す。原始星 A1 に付随した半径 50 au ( $\sim 0.4''$ ) の星周円盤が捉えられている。

## 今後の展望

現在までに、多くの若い原始星天体でアウトフロー構造が検出されている。しかし、その回転運動の観測例は未だ限られている [3, 7, 12 など]。駆動源から離れた位置では、アウトフロー構造の半径が広がる傾向があるため [4]、比角運動量の値を固定すると回転速度は小さくなる。このため、アウトフローの回転運動を検出するには、駆動源の近くでのガスの速度構造を解像するような高解像度観測が望ましい。一般に、駆動源付近では降着ガスや回転円盤構造からの分子輝線放射による汚染があるため、これらの成分とアウトフロー構造を如何にして切り分けるかが鍵となる。前項で述べたように、分子マーカーによる化学診断は、視線上で重なったガスの速度構造を選択的に捉え、個別に解析するための強力なツールになり得る。

どの分子輝線がどのガス構造を捉えるのかは、天体ごとの化学的特徴によって異なる [10]。これまでの ALMA による個別観測の成果から、硫黄関連分子 (OCS, H<sub>2</sub>CS, SO など) が、有用な分子マーカーとして利用できることが予想される。そこで現在、分子輝線の振る舞いに対するより系統的な理解を目指して、幅広い化学的特徴をもつ複数の天体に対するサーベイ観測 (FAUST) を実施している。

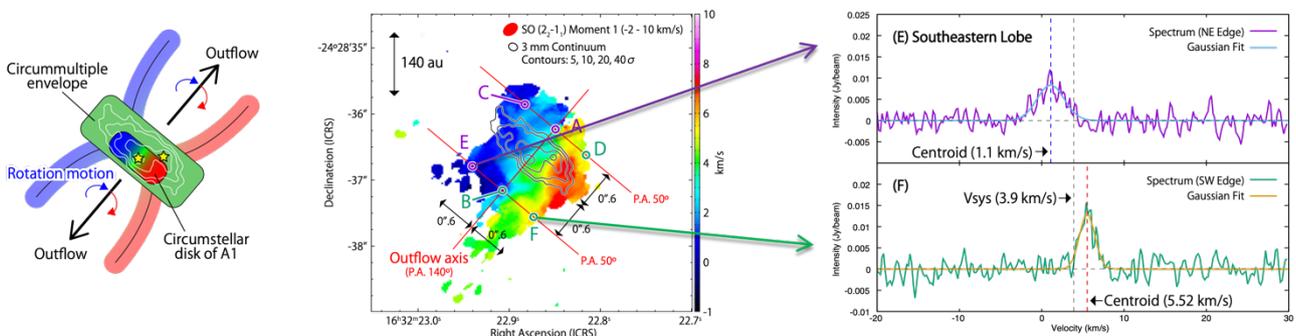


図 3: IRAS 16293–2422 Source A から噴き出すアウトフロー構造の ALMA による観測結果 [9]。(左) Source A の周連星系降着ガス、原始星 A1 の星周円盤、および回転するアウトフロー構造の模式図。(中) SO 分子輝線の速度場の図 (カラー)。等高線は波長 3mm の連続波の分布を表す。北西-南東方向に伸びるアウトフロー構造上に、北東-南西方向に沿った速度勾配がみられる。この速度勾配は、アウトフローの軸周りの回転運動を示唆する。(右) 南東方向に伸びるアウトフローローブの縁での、SO 分子輝線のスペクトルの様子 (中図の点 E, 点 F の位置)。アウトフローの回転運動のため、二点でのガスの速度が異なっている。

表 1: IRAS 16293–2422 Source A の各構造でのガスの比角運動量の値 ( $10^{-4} \text{ km s}^{-1} \text{ pc}$ )

ガス構造	傾き角 <sup>a</sup>		参考文献
	60°	80°	
周連星系降着ガス	—	12.9 – 15.8	[8]
星周円盤 <sup>b</sup>	5.0 – 5.6	—	[8]
アウトフロー 北西ローブ	10.4 ± 0.3	9.1 ± 0.3	[9]
アウトフロー 南東ローブ	10.2 ± 0.3	8.9 ± 0.2	[9]

<sup>a</sup> 0° のとき、円盤は face-on の向きをもち、アウトフローの軸は視線方向と平行。

<sup>b</sup> 半径 50 au の位置での値。

また、降着ガスと回転円盤を区別するため、物理モデルによる擬似観測と教師あり機械学習による判別を組み合わせた解析手法を開発しつつある [11]。この手法を導入した予備実験では、観測された膨大な分子輝線の速度構造を無バイアスに判別することで、回転円盤構造の解析に適した輝線を抽出することができた。化学診断の知見とも組み合わせることで、分子輝線がもつ情報をより効率的に引き出すことが期待される。

回転運動は、宇宙において様々な空間スケールで普遍的に見られる現象である (原始星円盤、活動銀河核周りのトーラス構造など)。そこでの角運動量の再分配を理解することは、構造形成を支配する物理的要因に迫る重要な切り口を与え得る。本研究は星・惑星系形成過程におけるそのパイロット的な成果であり、物理構造進化の全容に迫るためには、より多くの天体での観測結果に基づいた一般的な理解が不可欠である。

## 参考文献

- [1] Dzib, S. A., Ortiz-Léon, G. N., Hernández-Gómez, A., et al. 2018, *Astronomy & Astrophysics*, 614, A20. doi:10.1051/0004-6361/201732093
- [2] Girart, J. M., Estalella, R., Palau, A., et al. 2014, *The Astrophysical Journal Letters*, 780, L11. doi:10.1088/2041-8205/780/1/L11
- [3] Hirota, T., Machida, M. N., Matsushita, Y., et al. 2017, *Nature Astronomy*, 1, 0146. doi:10.1038/s41550-017-0146
- [4] Hsieh, C.-H., Arce, H. G., Li, Z.-Y., et al. 2023, arXiv:2302.03174. doi:10.48550/arXiv.2302.03174
- [5] Maureira, M. J., Pineda, J. E., Segura-Cox, D. M., et al. 2020, *The Astrophysical Journal*, 897, 59. doi:10.3847/1538-4357/ab960b
- [6] Oya, Y., Sakai, N., López-Sepulcre, A., et al. 2016, *The Astrophysical Journal*, 824, 88. doi:10.3847/0004-637X/824/2/88
- [7] Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, 863, 72. doi:10.3847/1538-4357/aac42
- [8] Oya, Y. & Yamamoto, S. 2020, *The Astrophysical Journal*, 904, 185. doi:10.3847/1538-4357/abbe14
- [9] Oya, Y., Watanabe, Y., López-Sepulcre, A., et al. 2021, *The Astrophysical Journal*, 921, 12. doi:10.3847/1538-4357/ac0a72
- [10] Oya, Y., 2022, Springer Nature, ISBN: 978-981-19-1708-0
- [11] Oya, Y., Kibukawa, H., Miyake, S., et al. 2022, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 134, 094301. doi:10.1088/1538-3873/ac8839
- [12] Zhang, Y., Higuchi, A. E., Sakai, N., et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, 864, 76. doi:10.3847/1538-4357/aad7ba

## 今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催場所
5/11 (木) 15:00-16:30	第2回 宇宙学セミナー 大屋瑤子 先生 (基礎物理学研究所) タイトル: 化学診断で見る低質量原始星 天体での円盤構造形成	ZOOM によるオンライン開催です。HP に掲載のリンクから登録・参加をお願い致します。
6/18 (日) 13:00-17:00	宇宙医学委託費事業: 宇宙医学教育プログラム実習全体報告会 (2022 年度に実施した宇宙医学実習の 各訪問先の見学内容についての報告)	ハイブリッド形式 <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 会場 (京都大学理学研究科 セミナーハウス)</li> <li>➤ zoom</li> </ul> 一般の方の参加も歓迎します。 申込方法等については準備ができ次第宇宙ユニット HP に掲載致します。

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.uss.kyoto-u.ac.jp/seminar/>) で公開いたします。

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

### 京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.uss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人: 白戸春日(宇宙ユニット RA)

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: [uss@kwasan.kyoto-u.ac.jp](mailto:uss@kwasan.kyoto-u.ac.jp)