



Title	大質量星形成の極初期段階における複雑な有機分子
Author(s)	酒井, 剛
Citation	低温科学, 78, 253-258
Issue Date	2020-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.78.253
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77789
Type	departmental bulletin paper
File Information	28_p253-258.LT78.pdf



大質量星形成の極初期段階における複雑な有機分子

酒井 剛^{1)*}

2019年11月11日受付, 2019年11月19日受理

大質量星（太陽の8倍以上の質量を持つ恒星）形成領域において原始星周囲の化学組成は、小質量星形成領域のそれとは異なる点が見られる。特に、窒素を含む複雑な有機分子の存在量は、大質量星形成領域の方が多い。大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA を用い、大質量星形成の極初期段階にある天体（G34.43+00.24 MM3）を観測したところ、窒素を含む複雑な有機分子の存在量が、他の比較的進化の進んだ大質量星形成領域と同程度であることがわかった。このことは、大質量星形成において、原始星周囲の化学組成は極初期から小質量星形成領域の化学組成と異なっていることを示している。本稿では、重水素化分子などの存在量も踏まえ、大質量星形成領域の複雑な有機分子の起源について議論する。

COMs in early stages of high-mass star formation

Takeshi Sakai¹

The chemical compounds in high-mass protostars are different from those in low-mass protostars. For example, nitrogen-bearing complex organic molecules (N-bearing COMs), such as $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$, are known to be more abundant in high-mass sources than in low-mass sources. We observed a very young protostar in a high-mass star-forming region (G34.43+00.24 MM3) and found that the abundance of $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ in G34.43+00.24 MM3 is as high as that in other high-mass sources. In this paper, we discuss the origin of the COMs in high-mass star-forming regions.

キーワード：大質量星形成, 有機分子, 星間分子

high-mass star formation, complex organic molecules, interstellar molecules

1. はじめに

太陽の8倍以上の質量を持つ恒星を大質量星と呼ぶ。大質量星は、太陽のような小質量星に比べ高い表面温度を持ち、強力な紫外線を放射する。また、強力な星風や、形成時の巨大な分子流などによっても、周囲の環境に大きな影響を与え、銀河内の星形成において重要な役割を

果たしている。さらに、大質量星は一生の最後に超新星爆発を起こし、星間空間に莫大なエネルギーを放出するとともに、様々な元素を撒き散らす。したがって、大質量星は、銀河内の物質進化においても非常に重要な役割を果たしている。

大質量星は、質量の大きな分子ガスの塊（分子雲クラump）の中で星団として形成されることが知られている（e.g., Shirley et al. 2003）。大質量な分子雲クラump内部で、高密度な分子ガスの塊（高密度分子雲コア）が形成され、そこで大質量星が誕生する。高密度分子雲コア内部で誕生する大質量星は、小質量星に比べ100倍以上高い質量降着率で形成されると考えられている（e.g., McKee and Tan 2003）。生まれたばかりの星（原始星）は、質量降着のエネルギーによって輝いているため、質量降着率の高い大質量星形成では、温度環境など、小質

*連絡先

酒井 剛

電気通信大学 基盤理工学専攻

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

e-mail: takeshi.sakai@uec.ac.jp

1) 電気通信大学大学院情報理工学研究科

Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Tokyo, Japan

量星形成と異なる性質を持つと考えられる。本稿では、そのような大質量形成領域における複雑な有機分子の観測結果を紹介し、その起源について議論する。また、本稿後半で、大質量星形成の極初期段階にある天体の化学組成について我々の観測結果を紹介し、大質量星形成領域と小質量星形成領域との違いを議論する。

2. 大質量原始星周囲の化学組成

質量降着率の高い大質量星形成では、高温領域が小質量星に比べ広範囲に広がり、ダスト表面で生成された分子が広範囲でガス中に昇華する。そのため、空間分解能が比較的低い望遠鏡でも様々な分子輝線が強く検出される。したがって、大質量原始星周囲の化学組成については、小質量星形成領域に比べ、より以前から研究されてきた。特に、我々に最も近い大質量星形成領域であるオリオン座 KL 領域の化学組成については、多くの研究が行われている。

オリオン座 KL 領域では、様々な複雑な有機分子のスペクトル線が大量に検出される。オリオン座 KL 領域において特徴的な点は、酸素を含む複雑な有機分子と窒素を含む複雑な有機分子の分布が異なることである (e.g., Blake et al., 1996)。窒素を含む複雑な有機分子はホットコアと呼ばれる原始星近傍の領域で強く検出されるが、酸素を含む複雑な有機分子は、原始星から少し離れたコンパクトリッジと呼ばれる領域で強く検出される。したがって、酸素を含む複雑な有機分子と窒素を含む複雑な有機分子は、異なる起源を持つと考えられる。

また、大質量原始星周囲の化学組成は、小質量星原始星周囲の化学組成と似た組成を示すが、大きく異なる点も見られる。酸素を含む複雑な有機分子の存在量は、大質量原始星と小質量原始星周囲で非常によく一致することが知られている (Taquet et al., 2015)。一方、窒素を含む複雑な有機分子の存在量は、大質量星形成領域の方が、小質量星形成領域より一桁以上多い (Taquet et al., 2015)。また、分子の重水素濃縮度 ($\text{CH}_2\text{DOH}/\text{CH}_3\text{OH}$ 比など) が、大質量原始星周囲では、小質量原始星周囲

に比べ有意に低い値が得られている (e.g., Bøgelund et al., 2018)。これらの違いがなぜ生じるのか、まだはっきりとしたことはわかっていない。本稿では、大質量星形成の極初期段階における複雑な有機分子や重水素化分子などの観測結果を紹介し、その起源について議論する。まず、次章で、星形成と複雑な有機分子の生成過程との関係について、簡単に説明する。

3. 複雑な有機分子の生成過程

原始星周囲で検出される複雑な有機分子の多くは、ダスト上で生成され则认为られている。図1に星形成と分子の生成過程についての模式図を示す。原始星が形成される以前の内部に熱源を含まない段階では、分子雲の温度は 10 K 程度である。そのような低温状態において、分子雲の密度が増加すると、一酸化炭素 (CO) など多くの分子がダスト上に吸着する。吸着した分子は、ダスト上で反応し、メタノール (CH_3OH) などの分子が形成される。また、分子雲内部で原始星が誕生すると、原始星が周囲のガスやダストを加熱する。加熱されたダスト上では、HCO や CH_3O などのラジカルの移動度が増加し、様々な複雑な分子が生成される (e.g., Garrod, 2013)。原始星周囲の温度がさらに上昇し 100 K 程度になると、様々な分子がダストから昇華し、ミリ波サブミリ波帯のスペクトル線で観測されるようになる。その後、昇華した分子はガス中で反応し、他の分子が生成される。

分子の生成過程を考える上で、これらのどの段階の性質の違いが、分子の存在量に影響を与えているか知ることが重要である。特に、ダスト上でどんな分子がどれくらい生成されるのか明らかにするためには、ダストから昇華したばかりの分子ガスを観測する必要がある。そのためには、高密度分子雲コア内部で誕生したばかりの原始星周囲のガスの組成を調べる必要があるが、そのような天体の化学組成を詳細に調べた例はまだ非常に少ない。次章では、我々が発見した大質量星形成の極初期段階にあると思われる原始星周囲の観測結果について紹介

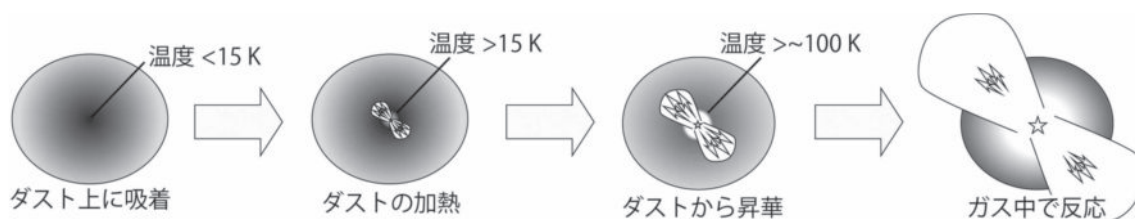


図1：星形成と分子の生成との関係についての模式図

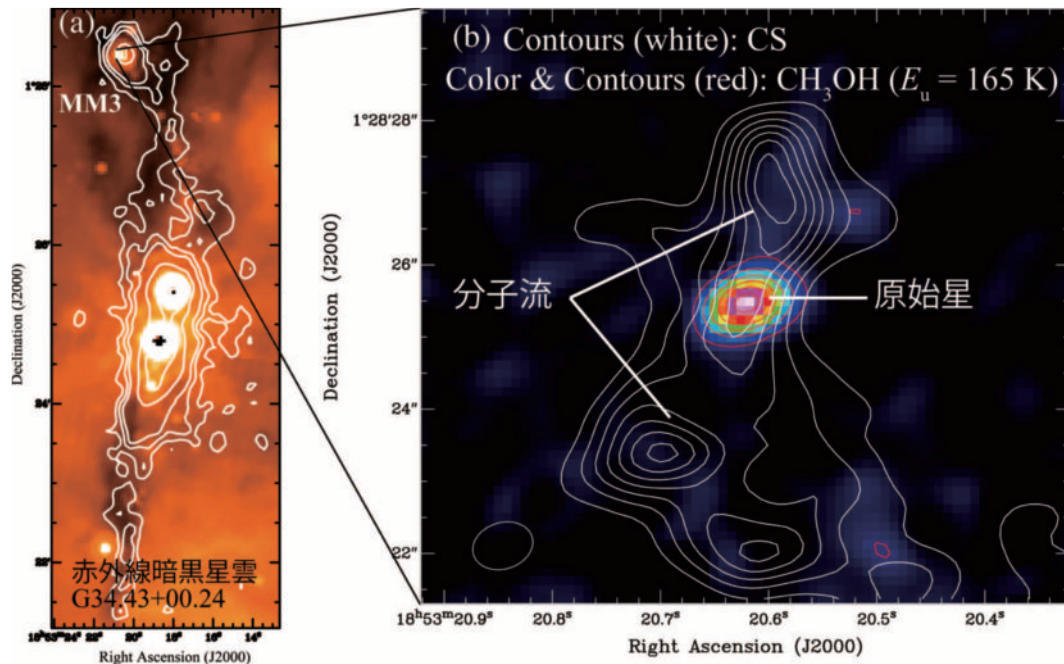


図2：(a) 赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 に対する 24 μ m (カラー) と 1.2 mm (コントア) の観測結果 (Rathborne et al. 2005 を改変)。(b) G34.43+00.24 MM3 に対する ALMA を用いた観測結果 (Sakai et al. 2013 の観測データを使用)。

し、より進化の進んだ段階の大質量原始星や小質量原始星と比較することで、大質量原始星周囲の化学組成の違いがなぜ生じているのか議論する。

4. 大質量星形成初期天体の観測：赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3

大質量星形成の極初期段階にあると考えられている天体が、赤外線暗黒星雲と呼ばれる天体である。赤外線暗黒星雲とは、中間赤外線で暗く見える天体であり、内部に明るい大質量星を伴わない低温高密度かつ大質量な分子雲である (e.g., Rathborne et al., 2006)。我々は、ALMA を用い、赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 にある分子雲クランプ MM3 (以降、G34.43+00.24 MM3) を観測した。G34.43+00.24 MM3 は距離 3.7 kpc に位置し、質量が約 300 太陽質量の天体である (Rathborne et al., 2006)。この赤外線暗黒星雲 (G34.43+00.24) 内に存在する他の分子雲クランプには HII 領域を伴う大質量星形成領域が存在し、既に大質量星形成が起きている。G34.43+00.24 MM3 でも大質量星が形成される可能性は高い。

4-1. 赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 に付随する原始星

赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 に対して、

ALMA を用い分解能 0.8 秒角で観測を行った結果、極若い分子流を伴う原始星を発見した (図2; Sakai et al., 2013)。分子流の速度とサイズから分子流の年齢を見積もると 1900 年以下 (上限値となっているのは天体の角度が正確に見積もれないためである) であった。さらに、分子流と周囲の低温ガスが衝突している様子も見られ (Yanagida et al., 2014)、この原始星は極若い進化段階にあると考えられる。

4-2. G34.43+00.24 MM3 に付随する原始星周囲の複雑な有機分子

G34.43+00.24 MM3 の原始星周囲において、様々な複雑な有機分子が観測された (図3; Sakai et al., 2018)。酸素を含む有機分子 (CH_3OCH_3 , HCOOCH_3) と窒素を含む有機分子 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$) の両方が観測されたが、両者の分布の違いはみられていない。局所熱平衡を仮定し、それぞれの分子の柱密度を見積もり、メタノールに対する存在量を比較した (図4)。その結果、酸素を含む複雑な有機分子については、他の大質量星形成領域、小質量星形成領域とほぼ同じ値を示したが、窒素を含む複雑な有機分子については、小質量星形成領域より、大質量星形成領域に近い値となった。G34.43+00.24 MM3 に付随する原始星は極若いと考えられ、その周囲のガスはダストから昇華したばかりの分子によるものと考えられる。したがって、ここで観測された複雑な有機分子の

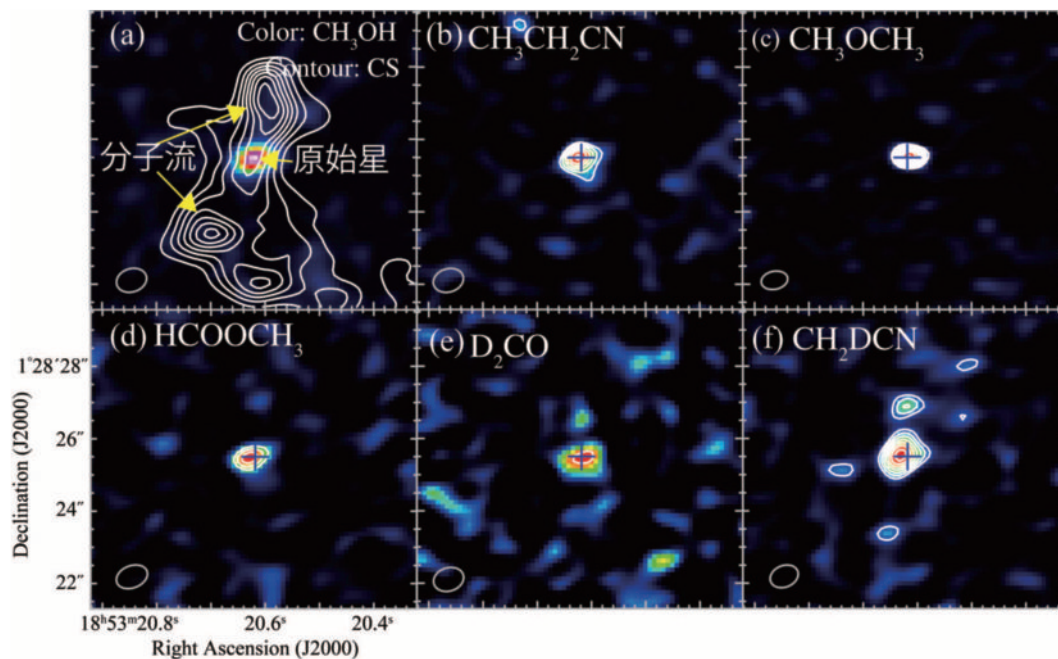


図3：赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 に対する ALMA を用いた複雑な有機分子などの観測結果 (Sakai et al. 2018 を改変)

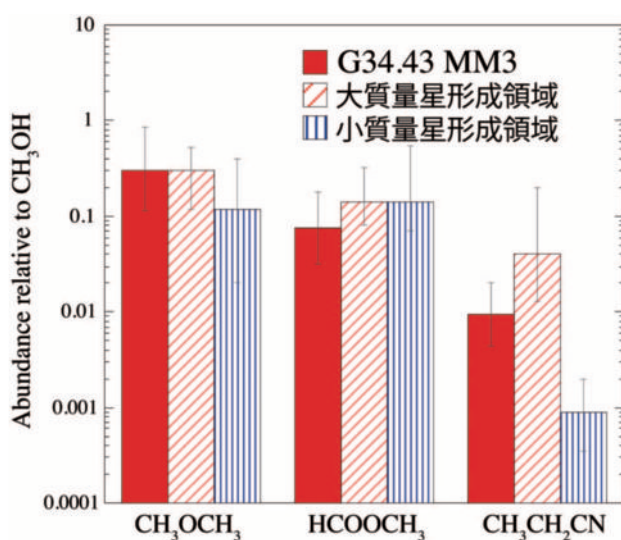


図4：複雑な有機分子とメタノールの存在量比の比較 (Sakai et al. 2018 を改変). 大質量星形成領域と小質量星形成領域のデータは Taquet et al. (2015) から引用した.

組成は、ダスト上で生成された分子の組成を反映している可能性が高い。つまり、そのような状況で、窒素を含む複雑な有機分子が豊富に存在することは、大質量星形成領域と小質量星形成領域における窒素を含む複雑な有機分子の存在量の違いは、昇華後のガス中の反応ではなく、ダスト上での反応に起因している可能性が高いと言える。

最近の化学モデル計算によると、ダストの加熱時間が長い方が $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}/\text{CH}_3\text{OH}$ 比が高くなると予想され

ている (Garrod et al., 2017). しかし, G34.43+00.24 MM3 に付随する原始星は極若く, 加熱時間は小質量星形成領域などに比べて短いはずである. したがって, 観測結果は, 一見, 化学モデル計算と矛盾するよう見える. 一つの可能性として, この領域全体が外部から加熱され, 原始星が誕生する以前から長い間比較的高温であったと考えることができる. 星ができる前の初期の温度については, 重水素濃縮度から調べることが可能であり, 次節で, 重水素化分子の観測結果について述べる.

4-3. G34.43+00.24 MM3 に付随する原始星周囲の重水素濃縮度

低温な分子雲では, 分子の重水素濃縮が起きていることが知られている (e.g., Bergin and Tafalla, 2007). 分子の重水素濃縮度は, 分子雲の温度に依存し, 星形成前の低温時 (<20 K) により高くなる. また, 分子雲コア内部で原始星が誕生し, 周囲の温度が上昇すると, 重水素濃縮度は解消されていく. しかし, 中性分子については, 温度上昇後も破壊反応がすぐには進まないため, 中性分子の重水素濃縮度は, 星形成後も星形成前の値を保持すると考えられる. したがって, 原始星周囲の重水素化分子の存在量から, 星形成前の低温状態の長さについての情報を得ることが可能である (e.g., Sakai et al., 2015).

G34.43+00.24 MM3 周囲において, D_2CO が検出された (図3). D_2CO は, 低温時にダスト上で生成されと考えられている分子である. さらに, CH_3CN の重水

素化分子である CH_2DCN も検出された (図 3). 大質量星形成領域の原始星周囲で CH_2DCN が検出された例はほとんど報告がなく, この天体で重水素化分子の存在量が比較的高いことが示唆される.

メタノールに対する D_2CO の存在量を, G34.43+00.24 MM3 と他の天体とで比較したところ, 大質量星形成領域や中質量星形成領域より, 小質量星形成領域の値に近いことがわかった (図 5). D_2CO は低温時に多く生成される分子であり, D_2CO の存在量が低温時の長さを反映するとすれば, G34.43+00.24 MM3 は, 低温状態が比較的長く続いていたと予想される. そうであるとすれば, G34.43+00.24 MM3 において $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ の存在量が比較的多い要因は, ダストの加熱時間の長さではなく, 別の要因があると考えることができる. しかし, 低温状態が長くかつ, 加熱時間が長いという可能性もあり, まだはっきりとした結論を出すことはできない. このことを検証するためには, より多くの天体に対して観測を行い, 大質量星形成の極初期段階において窒素を含む複雑な有機分子が一般的に豊富に存在するのかなど明らかにする必要がある.

5. まとめと今後の展開

赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 に付随する大質量星形成の極初期段階にある原始星周囲の化学組成を調べた結果, 星形成の極初期段階から組成が異なっている可能性が示された. さらに, 重水素化分子の存在量から, G34.43+00.24 MM3 では, 低温時の長さが小質量星形成領域と同じように比較的長い可能性も示された. したがって, 小質量星形成と大質量星形成領域の違いは, 大質量星形成と小質量星形成におけるダストの加熱過程の違いに起因するのかもしれない. しかし, 大質量星形成の極初期段階にある天体の化学組成についての観測例は, まだ非常に少ない. 大質量星形成の極初期段階にある複数の天体を観測し, 化学組成を明らかにし, 多様性なども含め調査することが必要である.

最近, ALMA を用い, まだ星形成が起きていないと思われていた低温かつ大質量な赤外線暗黒星雲を複数観測した結果, 既に内部で活発な星形成が起きていることが明らかにされている (Sanhueza et al., 2019). そのような天体は, 大質量星形成の極初期段階にあると思われる, 大質量星形成の極初期段階の化学組成を知るために重要な観測ターゲットである. それら天体に対し, ALMA を用いたサーベイ観測を行うことで, 大質量星形成領域における複雑な有機分子の起源を明らかにすることがで

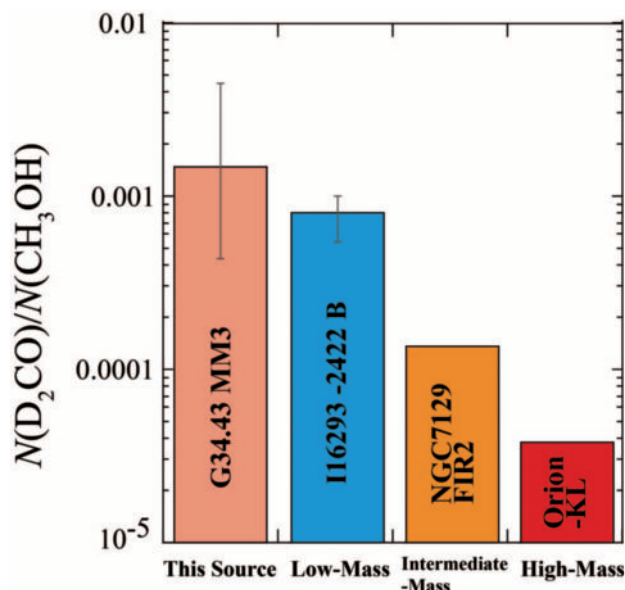


図 5: D_2CO とメタノールの存在量比の比較. 各天体のリファレンスは以下の通りである. IRAS 16293-2422 B (Jørgensen et al., 2016; Persson et al., 2018), NGC7129 FIR 2 (Fuente et al., 2014), Orion KL (Fuente et al., 2014 とそのリファレンス参照).

きると期待される.

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費 新学術領域研究 (25108005) と日本学術振興会の科学研究費 基盤研究 (C) (25400225, 16K05292) の支援を受けて行われました.

参考文献

- Bergin, E. A., M. Tafalla (2007) Cold Dark Clouds: The Initial Conditions for Star Formation, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **45**, 339-396.
- Blake, G. A., L. G. Mundy, J. E. Carlstrom, S. Padin, S. L. Scott, N. Z. Scoville, D. P. Woody (1996) A $\lambda = 1.3$ millimeter Aperture Synthesis Molecular Line Survey of Orion Kleinmann-Low, *The Astrophysical Journal Letters*, **472**, L49-L52.
- Bøgelund, E. G., B. A. McGuire, N. F. W. Ligterink, V. Taquet, C. L. Brogan, T. R. Hunter, J. C. Pearson, M. R. Hogerheijde, E. F. van Dishoeck (2018) Low levels of methanol deuteration in the high-mass star-forming region NGC 6334I, *Astronomy and Astrophysics*, **615**, A88.
- Fuente, A., J. Cernicharo, P. Caselli, C. McCoey, D. Johnstone, M. Fich, T. van Kempen, A. Palau, U. A. Yildız, B. Tercero, A. Lopez (2014) The hot core towards the intermediate-mass protostar NGC 7129 FIRS 2. Chemical similarities

- with Orion KL, *Astronomy and Astrophysics*, **568**, A65.
- Garrod, R. T. (2013) A Three-phase Chemical Model of Hot Cores: The Formation of Glycine, *The Astrophysical Journal*, **765**, 60.
- Garrod, R. T., A. Belloche, H. S. P. Mueller, K. M. Menten (2017) Exploring molecular complexity with ALMA (EMoCA): Simulations of branched carbon-chain chemistry in Sgr B2(N), *Astronomy and Astrophysics*, **601**, A48.
- Jørgensen, J. K., M. H. D. van der Wiel, A. Coutens, J. M. Lykke, H. S. P. Muller, E. F. van Dishoeck, H. Calcutt, P. Bjerkeli, T. L. Bourke, M. N. Drozdovskaya, C. Favre, E. C. Fayolle, R. T. Garrod, S. K. Jacobsen, K. I. Oberg, M. V. Persson, S. F. Wampfler (2016) The ALMA Protostellar Interferometric Line Survey (PILS). First results from an unbiased submillimeter wavelength line survey of the Class 0 protostellar binary IRAS 16293-2422 with ALMA, *Astronomy and Astrophysics*, **595**, A117.
- McKee, C. F., J. C. Tan (2003) The Formation of Massive Stars from Turbulent Cores, *The Astrophysical Journal*, **585**, 850-871.
- Persson, M. V., J. K. Jørgensen, H. S. P. Muller, A. Coutens, E. F. van Dishoeck, V. Taquet, H. Calcutt, M. H. D. van der Wiel, T. L. Bourke, S. Wampfler (2018) The ALMA-PILS Survey: Formaldehyde deuteration in warm gas on small scales toward IRAS 16293-2422 B, *Astronomy and Astrophysics*, **610**, A54.
- Rathborne, J. M., J. M. Jackson, E. T. Chambers, R. Simon, R. Shipman, W. Frieswijk (2005) Massive Protostars in the Infrared Dark Cloud MSXDC G034.43 + 00.24, *The Astrophysical Journal*, **630**, L181-L184.
- Rathborne, J. M., J. M. Jackson, R. Simon (2006) Infrared Dark Clouds: Precursors to Star Clusters, *The Astrophysical Journal*, **641**, 389-405.
- Sakai, T., N. Sakai, J. B. Foster, P. Sanhueza, J. M. Jackson, M. Kassis, K. Furuya, Y. Aikawa, T. Hirota, S. Yamamoto (2013) ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43 + 00.24 MM3: Hot Core and Molecular Outflows, *The Astrophysical Journal Letters*, **775**, L31.
- Sakai, T., N. Sakai, K. Furuya, Y. Aikawa, T. Hirota, J. B. Foster, P. Sanhueza, J. M. Jackson, S. Yamamoto (2015) ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43 + 00.24 MM3: DNC/HNC Ratio, *The Astrophysical Journal*, **803**, 70.
- Sakai, T., T. Yanagida, K. Furuya, Y. Aikawa, P. Sanhueza, N. Sakai, T. Hirota, J. M. Jackson, S. Yamamoto (2018) ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43 + 00.24 MM3: Complex Organic and Deuterated Molecules, *The Astrophysical Journal*, **857**, 35.
- Sanhueza, P., Y. Contreras, B. Wu, J. M. Jackson, A. E. Guzmán, Q. Zhang, S. Li, X. Lu, A. Silva, N. Izumi, T. Liu, R. E. Miura, K. Tatematsu, T. Sakai, H. Beuther, G. Garay, S. Ohashi, M. Saito, F. Nakamura, K. Saigo, V. S. Veena, Q. Nguyen-Luong, D. Tafuya (2019) The ALMA Survey of 70 μm Dark High-mass Clumps in Early Stages (ASHES). I. Pilot Survey: Clump Fragmentation, *The Astrophysical Journal*, **886**, 120.
- Shirley, Y. L., N. J., II Evans, K. E. Young, C. Knez, D. T. Jaffe (2003) A CS J = 5 $\rightarrow$ 4 Mapping Survey Toward High-Mass Star-forming Cores Associated with Water Masers, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **149**, 375-403.
- Taquet, V., A. Lopez-Sepulcre, C. Ceccarelli, R. Neri, C. Kahane, S. B. Charnley (2015) Constraining the Abundances of Complex Organics in the Inner Regions of Solar-type Protostars, *The Astrophysical Journal*, **804**, 81.
- Yanagida, T., T. Sakai, T. Hirota, N. Sakai, J. B. Foster, P. Sanhueza, J. M. Jackson, K. Furuya, Y. Aikawa, S. Yamamoto (2014) ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43 + 00.24 MM3: 278 GHz Class I Methanol Masers, *The Astrophysical Journal Letters*, **794**, L10.