



Title	原始惑星系円盤への物質降着におけるダスト表面分子の昇華過程
Author(s)	三浦, 均
Citation	低温科学, 78, 173-179
Issue Date	2020-03-24
DOI	10.14943/lowtemsci.78.173
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/77779
Type	bulletin (article)
File Information	20_p173-179.LT78.pdf



[Instructions for use](#)

原始惑星系円盤への物質降着における ダスト表面分子の昇華過程

三浦 均^{1)*}

2019年11月1日受付, 2019年11月4日受理

恒星やその周りを公転する惑星系は、星間物質が重力収縮することで作られる。星間空間は極めて低温なので、様々な分子が星間塵の表面に凍りついていると考えられている。この分子はこのまま惑星に取り込まれるのだろうか。それとも、その前に昇華して取り去られてしまうのだろうか。本記事では、星間塵表面に吸着した分子の昇華過程を宇宙物理学的手法によって理論解析した研究成果 (Miura et al., 2017) を紹介する。

Thermal desorption of molecules adsorbed on interstellar dust particles in accretion flow onto protoplanetary disks

Hitoshi Miura¹

Stars and planetary systems are formed through the gravitational collapse of the interstellar medium. Because the interstellar region is so cold, it is thought that various molecules are frozen onto the surface of interstellar dust particles. It is still unknown, however, whether these molecules are incorporated into the planet as they are or whether they are removed from the surface of the dust particles by some process. In this paper, we introduce our paper published in *The Astrophysical Journal* (Miura et al., 2017), in which the thermal desorption process of molecules on the interstellar dust particles were theoretically investigated using an astrophysical method.

キーワード：原始星, 原始惑星系円盤, 星間塵, 降着衝撃波, 分子昇華

Protostar, protoplanetary disk, interstellar dust, accretion shock, thermal desorption of molecules

1. はじめに

人類は古代から、天に目を向け、そこで起きていることを理解しようと努めてきた。古代ギリシアの哲学者アリストテレスは、天体の運動は、地上とは異なる法則に支配されていると考えていた。その後、アイザック・ニュートンが万有引力の法則を発見し、天体と地上の運動を同じ力学原理で説明することに成功したのは有名な

話である。このように、我々人類が地上で見出した物理法則を宇宙空間にも適用し、様々な天文現象のメカニズムを理解しようとする学問を「宇宙物理学」という。

私は、新学術領域研究「宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系へ」の理論班の一員として、天文観測結果を宇宙物理学的手法によって理論的に解析する研究に取り組んだ。この記事では、巨大電波干渉望遠鏡「ALMA」による観測成果を解析した研究成果 (Miura et al., 2017) について、高校生および教養教育課程の大学生を対象として解説する。

1.1. 星間塵表面に凍りついた分子

宇宙空間には、主に水素からなる気体成分（ガス）と、岩石の元となる固体成分（ダスト）が存在している。星間空間を漂うダストのことを「星間塵」といい、大きさは $1\mu\text{m}$ よりも小さいと考えられている。星間空間は絶

*連絡先

三浦 均

名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科

〒467-8501 名古屋市瑞穂区瑞穂町山の畑 1

e-mail : miurah@nsc.nagoya-cu.ac.jp

1) 名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科

Graduate School of Natural Sciences, Nagoya city

University, Nagoya, Japan

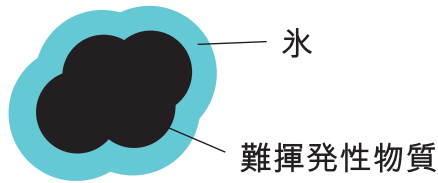


図1：星間塵の模式図。珪酸塩物質を主体とした難揮発性物質の周囲を、揮発性物質からなる氷が覆っている。

対温度でおよそ 10 K と非常に低温なので、揮発性の物質の多くが星間塵表面に凍りつき、図1に示すように「氷の層」を作っている。「氷」といっても、その成分は水 (H_2O) に限らず、一酸化炭素 (CO) やメタノール (CH_3OH) など様々な分子が混ざった「混合氷」である。氷の層には多種多様な分子が密に詰まっているため、化学反応が促進され、より複雑な分子が作られる。これを「星間塵表面反応」といい、星間空間での化学進化において重要な役割を果たしていると考えられている。実際、星間塵表面反応によって作られたであろう様々な有機分子が電波天文観測によって次々に発見されている。いずれ、アミノ酸のような生命素材物質が星間空間に見つかるともかもしれない。

さて、星間塵表面に凍りついている分子はその後どうなるのだろうか。星間空間には、ところどころに周囲よりもガスやダストが多く集まった「分子雲」と呼ばれる領域がある。分子雲はガスの圧力で支えられているが、物質がある程度濃集すると、分子雲内部の物質が万有引力によってお互いに引き合う力が圧力を上回り、中心に向かって潰れていく。これを「自己重力収縮」といい、その結果、図2に示すように、中心に恒星の卵である「原始星」が作られ、中心に落ちきることができなかった物質が原始星周囲を円盤状に取り巻く。この円盤状構造を「原始惑星系円盤」といい、この中で星間塵が集積して惑星が作られる。星間塵表面で作られた様々な有機分子も同様にして惑星に取り込まれることで、生命の素になるかもしれない。

1.2. 凍りついた分子の昇華

しかし、星間塵表面で作られた分子は、星間塵表面に凍りついたまま惑星に取り込まれるのだろうか。星間塵表面に凍りついている分子は揮発性が高く、少し加熱されただけでも昇華して、気相に逃げってしまう。実際に、本新学術領域研究の観測班により、星間物質が原始惑星系円盤に取り込まれる過程において分子の昇華が起きていることを示唆する観測的証拠が得られた (Sakai et al., 2014)。この観測結果は、原始惑星系円盤の外縁部周辺

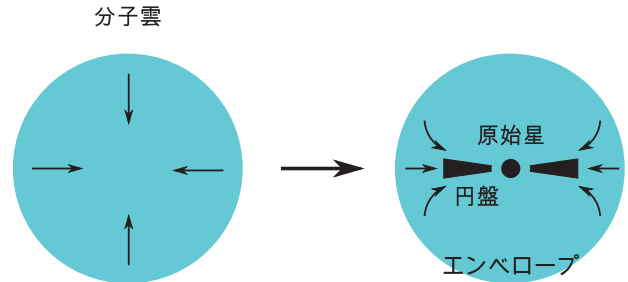


図2：分子雲の重力収縮の概念図。中心に原始星が作られ、その周囲をガスが円盤状に取り囲む。残りの成分（エンベロープ）も、時間とともに原始星や円盤に向かって降着していく。

において、ある分子の気相中の存在量が急激に増加していることを示している。中でも特に、一酸化硫黄 (SO) 分子は、円盤の外側にはほとんど存在しないのに、円盤の外縁部にはリング状に分布していた。この観測結果は、星間空間ではダスト表面に凍りついていた SO 分子が、原始惑星系円盤に取り込まれるときに昇華して気相に放出されたと考えれば説明がつく。

では、なぜ SO 分子は昇華したのだろうか。 SO 分子を昇華させるには、 SO 分子が吸着しているダストを 50 K 程度まで加熱する必要がある。加熱を引き起こす可能性として挙げられるのが、星間物質が原始惑星系円盤に降り積もるときに生じる衝撃波による加熱現象である。円盤の周囲には、まだ原始星や円盤に取り込まれていない物質が取り巻いている。これを「エンベロープ」といい、少しずつ円盤に向かって降り積もっている。この降着速度は、おおまかには原始星の重力によって物質が自由落下する速度に等しく、この系では約 2 km/s と見積もられる。一方で、円盤外縁部のガスの音速は約 0.5 km/s である。つまり、エンベロープは超音速で円盤に向かって降着するため、円盤と衝突することで衝撃波が生じる。これを「降着衝撃波」という。気体が衝撃波を通過する際、気体は瞬間的に圧縮され、断熱的に温度が急上昇する。このとき、ダストが 50 K 程度以上に加熱されれば、昇華した SO 分子がリング状に円盤を取り巻くことが説明できる。

1.3. 衝撃波によるダストの加熱

さて、降着衝撃波によって気体が加熱されることを説明したが、気体同様にダストが加熱されるわけではない。ダストの加熱は、気体と固体が異なる速度で運動することによって引き起こされる加熱現象として説明される。図3に示すように、気体成分は衝撃波面を通過するとき

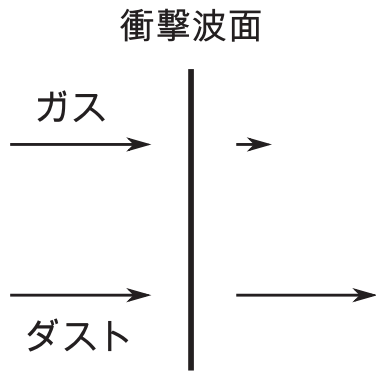


図3：衝撃波加熱の概念図。衝撃波面に対して流入するガスは、衝撃波面を通過した直後、急激に圧縮されて減速する。一方、ガスとともに流入してきたダストは、そのままの速度で通過する。結果として、衝撃波の後面において、ガスとダストの間に相対速度が生じ、ダストが加熱される。この図では、ガスは衝撃波面に対して垂直に流入すると想定している。

そのままの速度で衝撃波面を通過するため、衝撃波の後面において気体とダストの間に相対運動が生じ、ダストが加熱される。気体と物体の相対速度が引き起こす加熱現象としては、スペースシャトルや人工衛星などの大気圏再突入が挙げられる。これらの物体が真空に近い宇宙空間から地球などの大気圏に突入すると、大気中を物体が高速で運動することにより、物体の周囲の大気が断熱的に圧縮されて温度が上がり、熱伝導によって物体が加熱される。

ただし、上の説明は、あくまで気体を「流体」として扱った場合の話である。気体の中では、分子がお互いに衝突を繰り返しながらランダムに飛び交っている。ある分子が別の分子に衝突するまでの平均的な移動距離のことを平均自由行程といい、この間は分子はまっすぐに飛ぶことができる。地上における大気圏の平均自由行程は約 $0.1 \mu\text{m}$ と極めて短いので、我々は気体を「多数の分子の集合体」ではなく、一連の物体すなわち「流体」とみなすことができる。だが、星間ガスの密度は地球大気よりも10桁以上小さく、平均自由行程も1 km以上の長さに及ぶ。それに対し、星間塵のサイズは $1 \mu\text{m}$ 程度以下とはるかに小さいため、星間塵にとって気体とは「多数の分子の集合体」とみなされる。よって、降着衝撃波による星間塵の加熱現象をより正確に説明するならば、「気体と固体の間に相対運動が引き起こされた結果、ダスト表面に気体分子が直接個々に衝突することで、その運動エネルギーが熱としてダストに与えられる」となる。言葉で説明すると違いがわかりにくいですが、現象を物理的にモデル化する際には、現象を正確に記述する必要がある。このように、厳密に言えば大気圏再突入とは加熱の原理

が異なるが、気体と固体の相対運動が加熱を引き起こすという点では同じである。

降着衝撃波によって星間塵がどの程度加熱されるのかは、主に、星間物質が衝撃波面に流入する速さ（衝撃波速度）と流入するガスの密度（ガス数密度）に依存する。衝撃波速度が大きいほど、そして、ガス数密度が大きいほど、固体物質はより強く加熱される。

1.4. 分子の脱離エネルギー

先ほど、SO分子を昇華させるにはダストを約50 Kまで加熱する必要があると述べた。だが、この昇華温度は分子の種類によって変わる。SO分子以外にも、ギ酸メチル (HCOOCH_3) やメタノール (CH_3OH) といった分子が原始惑星系円盤周囲で観測されている (Oya et al., 2016)。これらの分子の昇華温度はそれぞれおよそ80 Kと100 Kと見積もられる。昇華温度の違いは、分子とダスト表面との結合力の違いに起因している。結合が強いほど、昇華温度がより高くなる。結合力は、分子とダスト表面との結合を切るのに必要なエネルギー（脱離エネルギー）をボルツマン定数 k_B で割った量 E として表される。 E は温度の単位を持つ量であり、星間化学のデータをまとめたデータベース (McElroy et al., 2013) によると、SO, HCOOCH_3 , CH_3OH 各分子の脱離エネルギーはそれぞれ、 $E = 2600, 4000, 4930 \text{ K}$ である¹。

では、ダスト表面に吸着しているすべてのSO分子が $E = 2600 \text{ K}$ という脱離エネルギーを持つかということ、そうではない。ダスト表面は、たとえ肉眼では平らに見えたとしても、原子スケールではデコボコしている。特に、星間塵は原子が規則正しく配列した構造を持つ結晶ではなく、原子の配列が乱れた非晶質という状態だと考えられており (Kemper et al., 2004)、その表面は原子スケールでは大きく荒れていると考えられる。ダスト表面に吸着している分子には、デコボコした表面の深い谷の部分に吸着している分子もあれば、でっぱった部分の先端に吸着している分子もあるだろう。直感的には、前者の分子は昇華しにくく、後者の分子が昇華しやすいと考えられる。実際に、数値計算によって非晶質氷の表面にCO分子を吸着させたところ、その脱離エネルギーは1090 Kを平均として、おおよそ460 Kから1740 Kまで広く分布することが示された (Al-Halabi et al., 2004)。これが意味することは、SO分子一種類に着目したとしても、脱離エネルギーが2600 Kより小さい分子もあれば、こ

¹ これは、たとえばSO分子の昇華温度が2600 Kだということを示しているわけではなく、あくまで結合力を数値化したものである。

れより大きい分子も同時に存在するということである。

1.5. 本研究の目的

ここまで、星間塵表面に凍りついた分子が降着衝撃波によって昇華するかどうかは、主に、衝撃波の強さと、分子の脱離エネルギーに依存することを説明した。衝撃波の強さは、衝撃波速度 v_s とガス数密度 n_0 で特徴づけられる。分子の脱離エネルギーは、それが正規分布をしていると仮定すると、平均値 E_0 と標準偏差 ΔE で特徴づけられる。先行研究 (Aota et al., 2015) では、様々な v_s , n_0 の値に対して衝撃波加熱の数値計算を行ない、分子の昇華割合を求めた。その結果、原始星 IRAS 04368+2557 の観測において示唆されていた SO 分子の昇華は、ガス数密度が観測から予想される範囲の上限値程度であれば、降着衝撃波によって十分に昇華しうることが示された。一方で、ガス数密度が観測から予想される範囲の中央値程度の場合は、ほとんど昇華が生じないことも示された。その後、原始星 IRAS 16293-2422 において HCOOCH₃ 分子と CH₃OH 分子の昇華が示唆される観測結果が得られたが (Oya et al., 2016)、先行研究 (Aota et al., 2015) では HCOOCH₃ 分子については調べられていなかった。今後さらに増えると予想される観測データと照らし合わせるためには、特定の分子に着目するのではなく、より包括的な判定基準が必要である。

また、先行研究 (Aota et al., 2015) では、分子の脱離エネルギーが分布を持つ場合は想定されていなかった。脱離エネルギーが分布を持つということは、その平均値 E_0 よりも小さなエネルギーで脱離する分子が一定量存在することを意味する。このような分子は、より弱い衝撃波でも昇華するだろう。このことは、脱離エネルギーの分布の幅 ΔE も、昇華の可否を左右する重要な要素であることを意味している。

本研究では、衝撃波パラメータ v_s , n_0 と、分子の脱離エネルギー分布 E_0 , ΔE の4つの要素に着目し、分子が昇華する衝撃波条件を包括的に調べた。計算手法等の詳細は文献 (Miura et al., 2017) にゆずり、本記事では解析結果にフォーカスを当ててわかりやすく解説する。

2. 計算結果

図4に、衝撃波面を通過したあとのダスト温度変化の計算結果の例を示す。横軸は衝撃波面からの距離を表す。まず、ダスト温度は急激に上昇し、ピーク温度である 53 K に達する。その後は、ガスとダストの相対速度が小さくなるにつれて温度が下がり、最終的には周囲の

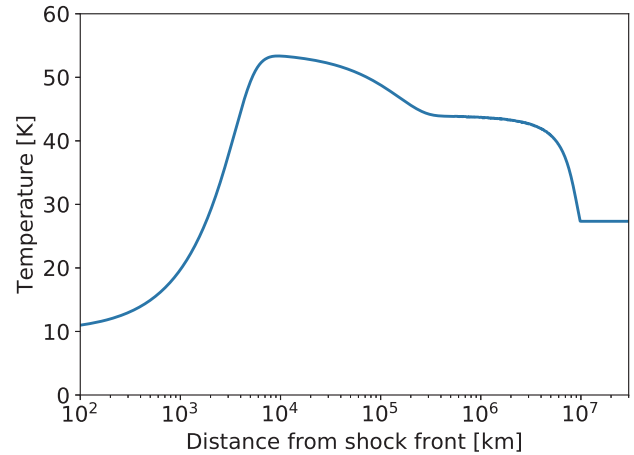


図4：衝撃波通過後のダスト温度変化の計算結果の例。横軸は衝撃波面からの距離を表す。衝撃波速度 2 km/s, ガス数密度 10^8 cm^{-3} , ダスト半径 $0.1 \mu\text{m}$ の場合。Miura et al. (2017) の図を改変。

ガスとほぼ同じ温度になる。ダストのピーク温度が SO 分子の昇華温度の目安である 50 K を超えているため、SO 分子の昇華が起きるであろうと予想できる。

次に、図4のダスト熱履歴を用いて、吸着分子の昇華過程の計算を行なった。加熱前のダスト表面に吸着している分子の脱離エネルギーは、平均値 $E_0=2000 \text{ K}$, 標準偏差 $\Delta E=400 \text{ K}$ の正規分布をしていると仮定した。ダスト加熱中は、それぞれの分子が、それぞれの脱離エネルギーに応じた速さで昇華していく。加熱前後における吸着分子の脱離エネルギー分布の変化を図5に示す。横軸は分子の脱離エネルギー E を表しており、縦軸はその脱離エネルギーを持つ分子の割合を示している。ダスト加熱前の初期分布を青で、加熱終了後のダスト表面に残っている分子の脱離エネルギー分布をオレンジで示している。ダストの加熱に伴い、脱離エネルギーの小さい分子が選択的に昇華することがわかる。図5に示した結果では、初期に吸着していた分子のおよそ半分が昇華することがわかった。

このような計算を様々な衝撃波パラメータに対して実施することで、どのような衝撃波条件で、どの分子が、どの程度昇華するのかを推測することができる。図6に、初期に吸着していた分子のうち10%が昇華する条件 (10%昇華条件) を示す。青、オレンジ、緑、赤で塗りつぶされた領域が、それぞれ、平均脱離エネルギー $E_0=2000, 3000, 4000, 5000 \text{ K}$ の分子の10%昇華条件を示している。この色塗り領域の幅の広さは、脱離エネルギーが分布を持たない場合と持つ場合の差の大きさを表している。つまり、各 E_0 の値に対して、脱離エネルギーが分布を持たない場合 ($\Delta E/E_0=0$) と分布を持つ場合 ($\Delta E/E_0=0.2$) の10%昇華条件をそれぞれ計算し、そ

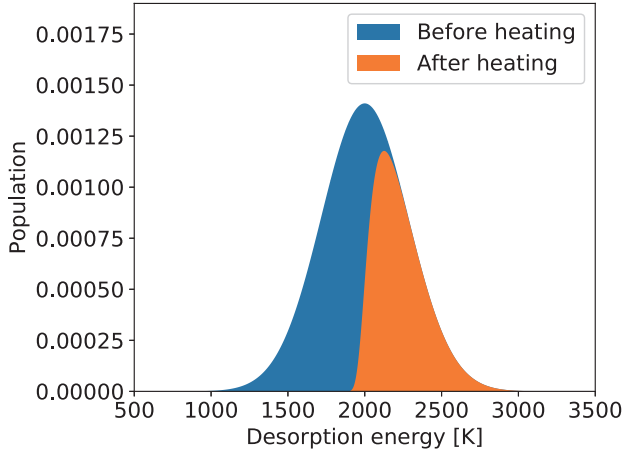


図5：衝撃波加熱前後における吸着分子の脱離エネルギー E の分布の変化。青は加熱前、オレンジは加熱後の分布を表す。Miura et al. (2017) の図を改変。

の間を塗りつぶしてある。なお、領域の右上境界が $\Delta E/E_0=0$ の場合の昇華条件を、左下境界が $\Delta E/E_0=0.2$ の場合の昇華条件を表している。このように、衝撃波パラメータ平面 v_s, n_0 上に昇華条件を描くことで、様々な分子の昇華条件をわかりやすく表すことができる。この図を「衝撃波ダイアグラム」という。

図6の衝撃波ダイアグラムには、各原始星の観測結果から予想される降着衝撃波のパラメータも合わせて表示してある(黒)。これにより、それぞれの原始星において観測されている分子の昇華が、降着衝撃波によって説明できるかどうかを判断できる。これについては、次の章で説明する。

3. 観測結果は降着衝撃波による加熱で説明できるのか？

ふたつの原始星 IRAS 04368+2557 (Sakai et al., 2014) と IRAS 04365+2535 (Sakai et al., 2016) では、SO 分子の昇華が示唆されている。原始星 IRAS 16293-2422 (Oya et al., 2016) では、 HCOOCH_3 分子と CH_3OH 分子の昇華が示唆されている。それぞれの原始星の観測デー

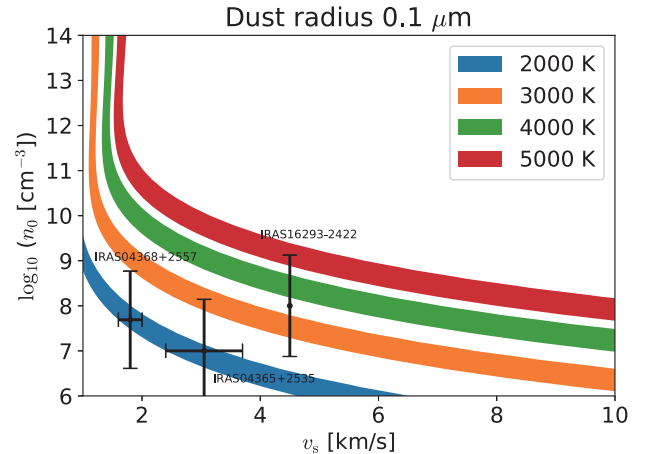


図6：吸着分子の10%が昇華するための衝撃波条件。ダスト半径が $0.1 \mu\text{m}$ の場合。色付きの帯はそれぞれ、分子の平均脱離エネルギーが $E_0 = 2000, 3000, 4000, 5000 \text{ K}$ の場合を示している。帯の幅は、脱離エネルギーが分布を持たない場合 ($\Delta E/E_0=0$) と分布を持つ場合 ($\Delta E/E_0=0.2$) の差の大きさを表す。原始星 IRAS 04368+2557, 04365+2535, 16293-2422 で予想される降着衝撃波パラメータ (表1 参照) を黒で示している。Miura et al. (2017) の図を改変。

タから推測される降着衝撃波パラメータを表1にまとめた。図6には、表1の観測データが示されている。これに基づき、それぞれの原始星において各分子が降着衝撃波によって昇華するかどうかを考察してみよう。

例えば、原始星 IRAS 04368+2557 の観測値は、 $E_0 = 2000 \text{ K}$ を示す青塗り領域とほぼ重なっている。これは、平均脱離エネルギーが 2000 K の吸着分子ならば、そのおよそ1割が降着衝撃波加熱によって昇華することを意味している。しかし、SO 分子の脱離エネルギーはこれより大きいので、昇華割合はより小さい。同じく SO 分子の昇華が示唆されている原始星 IRAS 04365+2535 の場合も、その推定値は青塗り領域とほぼ重なっていることから、SO 分子の昇華割合は1割未満だと判断できる。原始星 IRAS 16293-2422 は、他のふたつの原始星より大きな衝撃波速度が期待できることから、脱離エネルギーが 3000 K から 4000 K の間の吸着分子を昇華させることができると予想される。ただし、この原始星で観

表1：それぞれの原始星で観測された分子と、観測データから見積もられた衝撃波パラメータ。分子名の横の数値は、データベースに掲載されている各分子の脱離エネルギー E の値である。Miura et al. (2017) の表を改変。

原始星	衝撃波速度 v_s (km/s)	ガス数密度 n_0 (cm^{-3})	観測された分子
IRAS 04368+2557	1.8 ± 0.2	$1.2 \times 10^7 \sim 2 \times 10^8$	SO (2600 K)
IRAS 04365+2535	$2.4 \sim 3.7$	$1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8$	SO (2600 K)
IRAS 16293-2422	4.5	$10^7 \sim 10^9$	HCOOCH_3 (4000 K) CH_3OH (4930 K)

測されているふたつの分子の脱離エネルギーはこれより大きいので、これらの分子の昇華割合は1割程度以下だろうと判断できる。

上記は、ダストサイズを $0.1 \mu\text{m}$ と想定した場合の結論だった。では、より小さいダストを想定したら、結論はどう変わるのだろうか。小さい粒子は、自身のサイズより大きな波長の電磁波を出しにくいという性質を持っているため、放射冷却が効きにくくなる。よって、同じ衝撃波でもより高温まで加熱されるため、分子がより昇華しやすくなることが期待できる。ダスト半径を $0.01 \mu\text{m}$ とした場合の衝撃波ダイアグラムを図7に示す。図6と比べると、より弱い衝撃波で分子が昇華することがわかる。例えば、原始星 IRAS 04368+2557 と IRAS 04365+2535 においては、 $E_0=3000 \text{ K}$ 程度以下の分子は1割以上昇華するだろう。原始星 IRAS 16293-2422 においては、 $E_0=5000 \text{ K}$ 程度以下の分子は1割以上昇華するだろう。各原始星で観測されている分子の脱離エネルギーはこれらよりも小さいことから、いずれの場合においても1割以上の分子昇華が起きると判断できる。

4. それ以外の可能性

今回、降着衝撃波によるダスト加熱現象に着目し、星間塵表面に吸着している分子が昇華しうるかどうかを理論的に検証した。結果として、これらの分子が吸着しているダストのサイズが $0.1 \mu\text{m}$ より小さければ、これらの分子の昇華が降着衝撃波による加熱で説明できることが示された。だが、分子の昇華が降着衝撃波によるものと断定するには、それ以外の可能性がないことを示す必要がある。

降着衝撃波によるダスト加熱現象以外に分子が昇華する可能性として考えられるのは、原始星からの熱放射によるダスト加熱である。原始星の中心では核融合反応によるエネルギー生成はまだ始まっていないが、原始星に落下する物質の重力エネルギーが熱に変わり、それが熱放射として遠方へ広がり、その場の物体を加熱する。原始星に近いほどより強く加熱されるため、原始星に近い星間塵が原始星の熱放射によって加熱されたことで吸着分子が昇華した、という可能性が考えられる。

原始星 IRAS 04368+2557 の場合、円盤による光の遮蔽効果も考慮した理論計算により、円盤外縁部付近のダスト温度は原始星熱放射によって 30 K 程度までは加熱されうると見積もられている (Tobin et al., 2013)。これは、実際に ALMA 観測データから推定される温度 $23\sim 33 \text{ K}$ (Sakai et al., 2014) とよく一致している。SO 分子

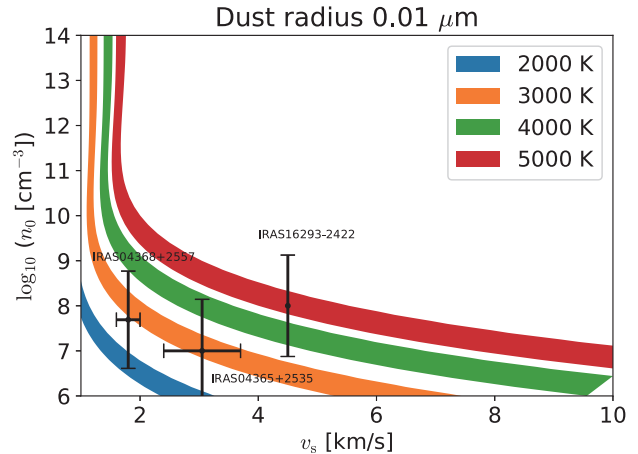


図7：図6と同じ。ただし、ダスト半径を $0.01 \mu\text{m}$ と想定した場合。Miura et al. (2017) の図を改変。

の昇華温度は 50 K 程度なので、原始星からの熱放射による加熱では昇華しないという結論になる。

一方、原始星 IRAS 04365+2535 の場合は、円盤の半径がより小さいため、円盤外縁部における原始星熱放射の影響がより強いと予想される。理論計算によると、円盤外縁部におけるダスト温度は $332 \pm 235 \text{ K}$ にもなると予想される (Brown and Chandler, 1999)。よって、この原始星においては、ダストが円盤に降り積もる前に原始星熱放射によって SO 分子が昇華してしまうため、降着衝撃波は不要という結論になる。実際に、SO 分子の分布が円盤の外側まで広がっている様子が観測されており (Sakai et al., 2016)、これは降着衝撃波ではなく、原始星熱放射による分子昇華を考えるほうが辻褄が合う。

最後に原始星 IRAS 16293-2422 だが、こちらについても、原始星熱放射の可能性は排除できない。理論計算により、円盤外縁部付近での温度は 130 K 程度と予想されており (Crimier et al., 2010)、これは HCOOCH_3 分子や CH_3OH 分子の昇華温度より高い。

以上より、降着衝撃波によるダスト加熱が吸着分子の昇華を引き起こしている可能性が高いのは、今回調査した3つの原始星のうち、IRAS 04368+2557 だけであることがわかった。

5. 結論

本研究では、衝撃波パラメータ v_s , n_0 と、分子の脱離エネルギー分布 E_0 , ΔE 、さらに、分子が凍りついているダストの大きさという5つの要素に着目し、星間塵表面に吸着している分子が降着衝撃波によって昇華しうる条件を包括的に調べた。分子が昇華する条件は「衝撃波

ダイアグラム」]としてまとめられ、これと観測データとを比較することで、原始星周辺で観測された分子が降着衝撃波によって昇華しうるかどうかを判断することができる。衝撃波ダイアグラムを用いて、これまでに得られた3つの原始星の観測データを解析したところ、分子が凍りついている星間塵のサイズが $0.01\ \mu\text{m}$ 程度であれば、すべての原始星において降着衝撃波による分子昇華が起こりうる、という結論が得られた。今回得られた衝撃波ダイアグラムは、原始星形成時における分子進化を理解する上で、観測データを解釈するひとつの指標となるだろう。

謝辞

今回の記事で解説した研究成果(Miura et al., 2017)は、新学術領域研究「宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系へ」(平成25年度～平成29年度)による援助を受けてなされた。

参考文献

- Al-Halabi, A., H. J. Fraser, G. J. Kroes and E. F. van Dishoeck (2004) Adsorption of CO on amorphous water-ice surfaces. *Astron. Astrophys.*, **422**, 777-791.
- Aota, T., T. Inoue and Y. Aikawa (2015) Evaporation of grain-surface species by shock waves in a protoplanetary disk. *Astrophys. J.*, **799**, 141.
- Brown, D. W. and C. J. Chandler (1999) Circumstellar kinematics and the measurement of stellar mass for the protostars TMC1 and TMC1A. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **303**, 855-863.
- Crimier, N., C. Ceccarelli, S. Maret, S. Bottinelli, E. Caux, C. Kahane, D. C. Lis and J. Olofsson (2010) The solar type protostar IRAS16293-2422: new constraints on the physical structure. *Astron. Astrophys.*, **519**, A65.
- Kemper, F., W. J. Vriend and A. G. G. M. Tielens (2004) The absence of crystalline silicates in the diffuse interstellar medium. *Astrophys. J.*, **609**, 826-837.
- McElroy, D., C. Walsh, A. J. Markwick, M. A. Cordiner, K. Smith and T. J. Millar (2013) The UMIST database for astrochemistry 2012. *Astron. Astrophys.*, **550**, A36.
- Miura, H., T. Yamamoto, H. Nomura, T. Nakamoto, K. K. Tanaka, H. Tanaka and M. Nagasawa (2017) Comprehensive study of thermal desorption of grain-surface species by accretion shocks around protostars. *Astrophys. J.*, **839**, 47.
- Oya, Y., N. Sakai, A. López-Sepulcre, Y. Watanabe, C. Ceccarelli, B. Lefloch, C. Favre and S. Yamamoto (2016) Infalling-rotating motion and associated chemical change in the envelope of IRAS 16293-2422 source A studied with ALMA. *Astrophys. J.*, **824**, 88.
- Sakai, N., Y. Oya, A. López-Sepulcre, Y. Watanabe, T. Sakai, T. Hirota, Y. Aikawa, C. Ceccarelli, B. Lefloch, E. Caux, C. Vastel, C. Kahane and S. Yamamoto (2016) Subarcsecond analysis of the infalling-rotating envelope around the class I protostar IRAS 04365+2535. *Astrophys. J. Lett.*, **820**, L34.
- Sakai, N., T. Sakai, T. Hirota, Y. Watanabe, C. Ceccarelli, C. Kahane, S. Bottinelli, E. Caux, K. Demyk, C. Vastel, A. Coutens, V. Taquet, N. Ohashi, S. Takakuwa, H.-W. Yen, Y. Aikawa and S. Yamamoto (2014) Change in the chemical composition of infalling gas forming a disk around a protostar. *Nature*, **507**, 78-80.
- Tobin, J. J., L. Hartmann, H.-F. Chiang, D. J. Wilner, L. W. Looney, L. Loinard, N. Calvet and P. D'Alessio (2013) Modeling the resolved disk around the Class 0 protostar L1527. *Astrophys. J.*, **771**, 48.

