

SPICAで探る星形成・星間媒質^{*1}

井上剛志¹・岩崎一成²・大屋瑤子³・
神鳥亮⁴・島尻芳人⁵・
立原研悟¹・古家健次⁶

〈¹名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉

〈²国立天文台天文シミュレーションプロジェクト 〒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 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈⁴アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈⁵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〉

〈⁶国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ¹tsuyoshi.inoue@nagoya-u.jp

SPICAサイエンス検討会星形成・星間媒質班ではSPICA時代を見据え総勢15名の体制でサイエンス検討を行った。本班では星間媒質の物質的性質から、星形成の現場である分子雲の熱的／化学的特性、磁場構造を含めた自己重力プラズマ系としての性質、さらには超新星の周辺環境や爆発によるダスト生成に至るまで幅広い分野にわたって検討が行われた。本稿ではその中でも特に分子雲に関する検討結果を、その形成機構から内部で起きる星形成に至るまでをスケールを追って解説する。

1. はじめに

星間媒質とは銀河の中で星々の間の空間に充満する物質の総称であり、水素を主成分としてヘリウムやその他の重元素がガスやダスト（星間塵）といった様々な形態で混在している。天体現象の多くが星間媒質を舞台として発生し、星形成は星間媒質で起きる天文現象の代表例であると言える。SPICAサイエンス検討会の星形成・星間媒質班では、星形成に留まらず超新星爆発などまで含めた星間媒質で繰り上げられる様々な現象や、複雑な性質を持つ星間塵の物性まで含めた広い分野にわたりSPICAで期待される新しいサイエン

スの検討が行われた。検討を行ったメンバーは下記の通りである（敬称略）。相川祐理（東京大学）、井上剛志（名古屋大学）、岩崎一成（国立天文台）、大屋瑤子（東京大学）、神鳥亮（アストロバイオロジーセンター）、坂井南美（理化学研究所）、島尻芳人（国立天文台）、下西隆（新潟大学）、立原研悟（名古屋大学）、野沢貴也（国立天文台）、日高宏（北海道大学）、古家健次（国立天文台）、古屋玲（徳島大学）、守屋堯（国立天文台）、山本智（東京大学）。

検討の大枠が分かる概要図を図1に示した。図1のバックグラウンドになっているのは星間媒質の中でも最も濃密な領域で星形成の舞台でもあ

^{*1} 本記事の投稿後、ESA側のコスト超過が明らかになり、SPICA計画の見直しが検討された。さらに本年10月にESA Cosmic Vision M5選抜に向けた検討を打ち切るという判断が、ESA、JAXA、提案機関であるオランダSRONの間で合意された。しかし本記事の内容は、この分野におけるスペース中間・遠赤外線観測のサイエンスを検討した結果を示すものとして価値があると考え、掲載することを決めたものである。

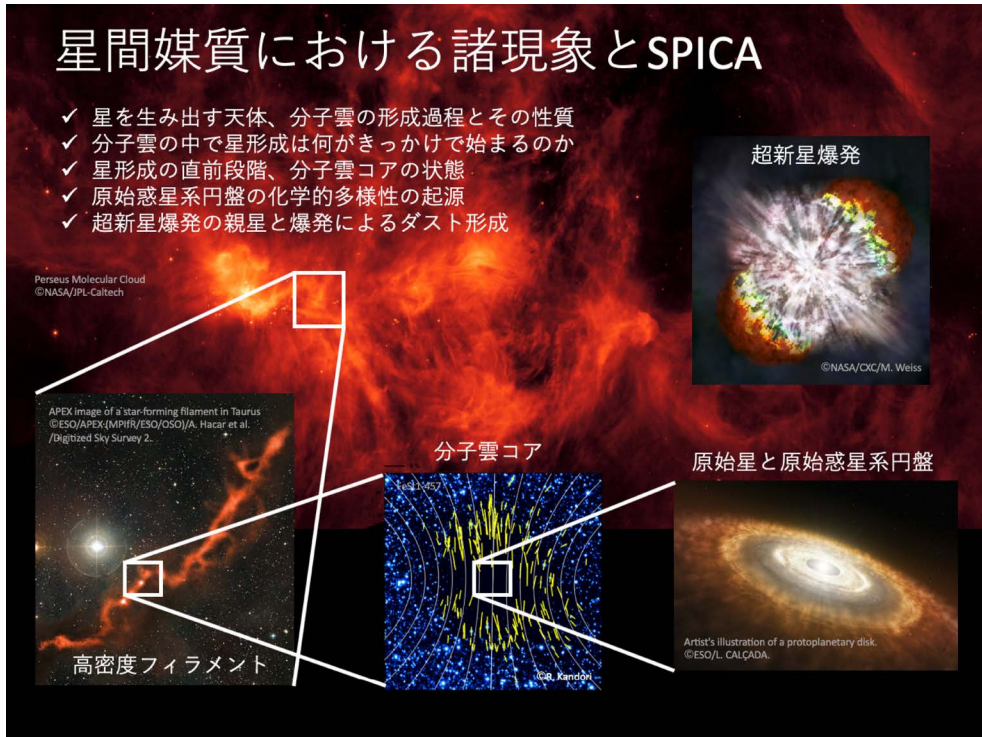


図1 星形成・星間媒質班の検討概略図。

る分子雲である。分子雲の中には高密度なフィラメント状の領域が普遍的に存在することが知られており、それらフィラメントの中でも質量が大きく重力的に不安定なものは分裂して分子雲コアと呼ばれる星形成直前の天体を形成する。重力崩壊した分子雲コアはその中心部に星を生み出し、星の周りには惑星形成の現場となる原始惑星系円盤が誕生する。星はその誕生後も進化を続け、星の中でも特に質量の大きなものはその寿命の最後に超新星爆発を引き起こす。

星形成・星間媒質班で行われたサイエンス検討をたどると、このような宇宙の物質循環過程を一通りめぐることができるが、残念ながら紙面の関係で全ての検討結果を紹介することはできない。以下本稿では分子雲の形成から始まり、徐々にスケールダウンしていった原始星の周辺環境に至るまでのサイエンスについて、SPICAで何を明らかにすることができるのかについて紹介する。

2. 分子雲の形成と多相構造

分子雲は星間媒質の中で最も濃密で冷たい成分であり、星形成の舞台となる極めて重要な天体である。これまで分子雲の観測には主にダスト連続波やCOなどの分子輝線が用いられ、特に星形成と直接関連する高密度領域に焦点が当てられてきた。それにより超音速乱流が普遍的に存在すること [1]、近年ではフィラメント状の構造が星形成において重要な役割を果たしていることが明らかになってきた (例えば [2])。しかし原子ガスから分子雲への相転移過程を考えると、COで同定される分子雲は、多相ガスとしての分子雲の一部分を見ているに過ぎないことが分かる。図2は、近年の化学反応などの素過程を取り入れた、原子ガスから分子雲への進化過程を追跡した数値流体シミュレーションの結果である [3-5]。得られる密度・温度構造は非常に非一様である。ここで注目

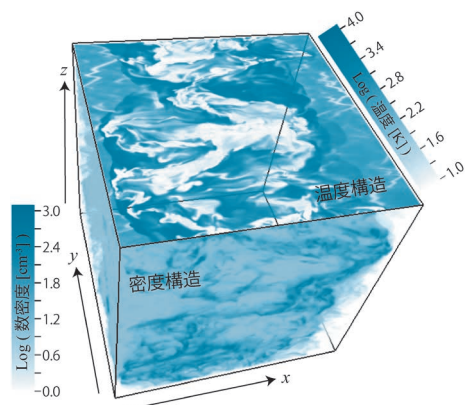


図2 数値シミュレーションによって得られた分子雲形成の様子. 3次元の密度構造と温度構造の2次元スライス (x - y 平面)を表す [3].

すべきは、COや[C I]で同定される低温高密度な相 (Cold Neutral Medium, CNM) の周囲は高温低密度な相 (Warm Neutral Medium, WNM) で満たされているということである。CNMの微細な雲はWNM中を超音速で動き回る。分子線で見えるのは分子を含むCNMだけなので、超音速乱流として観測されるのである。さらにこの速度はWNMにとっては亜音速であるため、衝撃波を伴う急速な散逸が起こらない。多相構造は超音速乱流の維持においても重要な役割を果たす。多数の微細分子雲が超音速の相対速度で運動していることも観測的に確かめられている [6]。WNMからCNM、そしてCNM内では原子ガスから分子ガスに相転移し、高密度クランプ・コア形成を経て星形成に至るが、それぞれの過程でのエネルギー収支の解明が、星間媒質の進化の理解に必須である。現にシミュレーションによるとWNM中の乱流エネルギーは、分子雲よりも卓越しており、分子雲の力学にWNMが重要な役割を果たしていることを示唆している。これまで着目されていた高密度領域に存在する中性炭素原子やCO分子だけでなく、それらでは同定できないWNMの分子雲形成・進化における役割を観測的に明らかにする必要がある。

SPICAに搭載される遠赤外線観測装置SAFARIの分光マッピング機能を使えば、WNMに存在する電離した炭素からの[C II]輝線 (遠赤外線158 μm) を捉えることができる。これまでBICEなどの気球望遠鏡 [7] や、最近ではSOFIA望遠鏡 [8] で[C II]観測が試みられてきたが、広域をカバーするが低空間分解能、または高空間分解能だが狭い領域に観測が限られていた。またWNMの主要なトレーサーとして水素の21 cm線が用いられてきたが、空間分解能が低く、また遍在する複数成分の視線上の重なりや光学的厚みの問題から、微細な構造の検出は困難だった。このように高空間分解能かつ広範囲をカバーするWNM観測はこれまでなされておらず、SPICAに対する期待は大きい。高い感度を持つことから、小マゼラン雲などの近傍銀河からの微弱な[C II]輝線の検出も可能であり、太陽近傍とは異なる環境下における分子雲の多相構造を調べることができる。

またWNMの中には、高密度部で形成され乱流拡散で漏れ出した水素分子が存在することが数値流体シミュレーションで指摘されている [9]。したがって水素分子の純回転輝線で同定できる可能性がある。実際に水素分子の純回転輝線の観測から、吸収線 [10] と輝線が検出されている [11]。しかし、輝線強度が弱いため詳細な空間分布と運動までは捉えることができていなかった。高感度で高分散のSPICA-SMIの中分散分光器 (MR) を使えば、水素分子純回転輝線でのマッピングが可能になると期待される。SPICAの大きな強みは、地上の望遠鏡によるCOや[C I]の高分解能観測と同等の空間分解能を達成できることにある。[C II]や水素分子純回転輝線のデータと、野辺山45 m電波望遠鏡や、ASTE, ACAを含むALMAなど地上電波望遠鏡によるCOと[C I]のデータを組み合わせることで、星間雲中のWNMから分子雲までの幅広い相の間の空間分布の違いを、数1,000 AUのスケールで議論することが可能となる。これらの観測から、分子雲微細

構造の内部と外部で温度・密度を知ることができ、乱流のエネルギー密度を明らかにできる。このように原子ガスや分子雲への相転移過程と、各相での乱流構造を具に調べることが可能となり、星形成の初期条件に制限を与えることが期待される。

3. 分子雲に埋め込まれた高密度フィラメント構造

現在宇宙で生まれている全ての星は分子雲の中で生まれているが、近年の高感度高分解能な観測によって原始星や星形成直前段階の天体である分子雲コアは分子雲の中でもとりわけ高密度なフィラメントと呼ばれる線状構造の上に分布していることが示されている [2]。つまり、分子雲の内部でどのようにフィラメント状の高密度構造が形成されるのかを明らかにすれば、星形成が理解できることになる。分子雲の中にフィラメント状の構造が形成される可能性については、上記のような観測的示唆が得られる前からいくつかの理論が提唱されており、現在までの多くの研究を総合すると、フィラメントの形成メカニズムは大雑把には次に述べる3つのタイプに大別することがきでる。(i) 衝撃波圧縮層などで生成されたシート状分子雲の自己重力による分裂 [12]。(ii) 超音速乱流で生成されたシート状構造同士の衝突交差面の構造 [13]。(iii) 分子雲クランプの衝撃波による爆縮形成 [14]。これらの形成機構の全ては分子雲が衝撃波に圧縮されることを引き金としているが、分子雲と衝撃波の相互作用は非常に普遍的であり、例えば超新星爆発や大質量星の放射が駆動する電離領域の膨張に伴う衝撃波、分子雲同士の衝突に伴う衝撃波などに分子雲は常にさらされ続けている。

重要なのはこれらの内どれが星形成にとって重要なメカニズムなのかを観測的に明らかにすることであるが、SPICAには分子雲からの偏光放射を観測し分子雲が帯びる磁場構造を測定可能な

B-BOPが搭載される予定であり、これがフィラメントの形成機構の解明に重要な役割を果たす。宇宙赤外線望遠鏡Herschelによる近傍星形成領域に対する探査観測から、フィラメントは0.1 pcの幅を持つことが明らかになっているが、B-BOPを用いて200 μm の波長で観測した場合、約18秒角の空間分解能を達成することができる。つまり、SPICAを用いれば400 pc以内の距離にあるフィラメントの詳細な磁場構造を知ることができる。また、B-BOPの感度があれば、濃密なフィラメント内部のみでなく、その周辺の磁場構造も同時に観測が可能である。この威力は絶大で例えば、上記 (iii) のフィラメント形成機構では図3のようにフィラメント周辺で磁場がたわむことが予言されており、容易にSPICAで検証できる。紙面の関係で本稿では省略するが、フィラメント内部の磁場の角度分布関数を解析することにより、上記 (i) と (ii), (iii) を区別することもSPICAなら可能である [16]。

星形成の中でも特に謎が大きいフィラメントにおける大質量星形成を解明するためには、フィラメント自体を十分空間分解し、フィラメントと周辺環境の関係を探るために広がった天体の構造を抑えた観測が重要となる。先に述べたように、SPICA単体でも距離400 pc以内のフィラメントを0.04 pc以下の空間分解能で詳細な構造まで調べることができる。しかしながら、大部分の大質量星形成領域は400 pcより遠方にあり、SPICAでは、それらの領域にあるフィラメントを空間分解することができない。そこで、考えられる手法の1つが、現在建設計画が練られているLarge sub millimeter Telescope (LST)やAtacama Large Aperture Submm/mm Telescope (AtLAST) といった大口径の地上望遠鏡にB-BOPと同じカメラを搭載して観測をし、SPICA/B-BOPにより取得されたデータと足し合わせることである。空間分解能は、アンテナ口径が大きければ大きいほど、良くなる。そのため、宇宙赤外線望遠鏡のよ

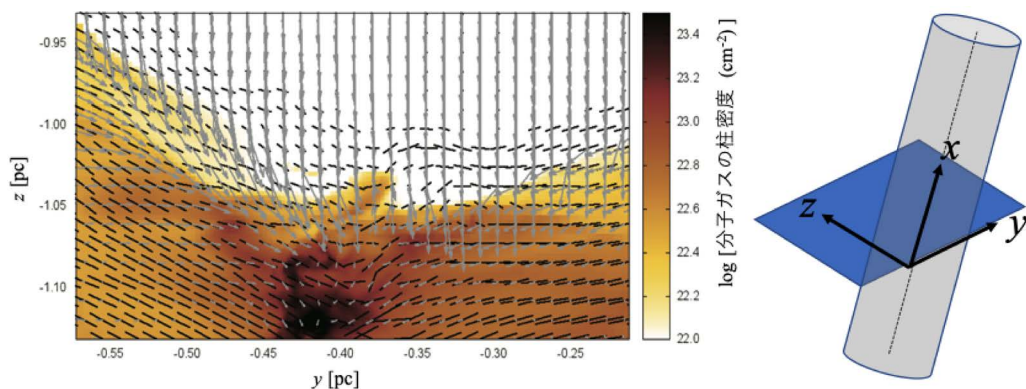


図3 左図: 磁気流体シミュレーションで形成された分子雲フィラメントの断面図 ([15]より抜粋)。黒い棒線は各場所での磁場の方向を表しており、ガスが集中しているフィラメント部分に向かって下に凸な方向分布をしていることが分かる(グレーの棒線は速度場なので注意)。このような磁場構造が観測されれば図の z 方向に伝搬する衝撃波によってフィラメントが形成された証拠になる。右図: 断面図の描画場所とフィラメントの位置関係。

うに打ち上げに重量制限のない地上望遠鏡の方がアンテナ口径が大きく、より高い空間分解能を得ることができる。例えば、30 mクラスの地上望遠鏡であれば、 ~ 3 秒角といった高い空間分解能のデータを取得することができ、2.5 kpc以内の距離にある30以上の大質量星形成領域のフィラメントの空間分解が可能となる。一方で、地上望遠鏡による観測では、大気雑音を取り除く際に、広がった構造を持つ天体からの放射も一緒に取り除かれてしまい、広がった構造が再現できないという問題点がある。宇宙赤外線望遠鏡であるSPICAによる観測は、大気の影響を受けないため、広がった構造を再現することが可能であるが、アンテナ口径が小さいため、空間分解能が小さいという問題点がある。そこで、両者のデータを足し合わせることで、高い空間分解能かつ広がった構造を抑えたイメージを作成する。この手法の有効性は、すでにHerschel宇宙赤外線望遠鏡に搭載されたSPIREと地上望遠鏡のAPEXに搭載されたArTeMiSカメラで取得されたデータで実証されている。このように、お互いの強みを活かすことで、初めて、大質量星形成領域におけるフィラメントにおける星形成の過程を明らかにすることが可能となる [17]。

4. 分子雲コアの磁場構造

恒星の形成母体は、高密度の分子ガスと塵の塊(分子雲コア)であり、この母体コアの性質のちに形成される恒星の物理量を決めると考えられている。ひとたび自己重力が他の対抗力(熱・乱流・磁場)を上回ったとき、その後の重力収縮を止めるメカニズムは存在しない。したがって、母体コアが重力収縮を始めた瞬間に持つ物理量が、星形成過程の初期物理状態を決める。この分野の研究は「星形成の初期条件問題」と呼ばれている [18]。この問題において、星形成初期におけるコアの磁気的性質の解明という課題が、その観測の困難さから、埋めるべき最後のピースとして残されている。

分子雲コアの性質について知るためには、コアの前段階、すなわち、より大きな構造からのコアの分裂機構や、ひいては分子雲そのものの形成過程にまで遡って理解を深める必要がある。したがって、10 pcスケールの大きな構造から1 pc以下の小さな構造へ、低密度($10^2\text{--}10^3\text{ cm}^{-3}$)から高密度($>10^4\text{ cm}^{-3}$)へ、横断的に物質移動の履歴をたどっていく必要がある。

分子雲形成から雲内構造形成(コアの形成と進

化)までを理解する際に本質的なのは、星間媒質が重力により濃集する際に磁力線を引きずって歪める過程(重力湾曲=物質移動の履歴)の検出である[19]。分子雲コアにおける磁場の湾曲は、中程度に濃密な領域(可視減光量 $A_V=5-20$ 等級)に現れるのが特徴で、B-BOPの存在しない現時点でこれを検出できるのは、近赤外線域での星間偏光測定のみである(図1の下段中央図[20])。なぜなら、可視域での星間偏光測定では、 $A_V>5$ 等級の領域を見通すことができず、地上からのサブミリ波での塵の熱放射偏光測定では、非常に濃密な領域($A_V>20$ 等級)を貫く直線磁場成分しか検出できないからである。

磁場の湾曲の現れ方の典型例は、物質が磁場を引きずりながら等方的に収縮した場合である。このときは、収縮コアの周りに砂時計型に歪んだ磁場構造が現れる[20-22]。砂時計は入れ子になっていることもあるだろう[23]。衝撃波と物質との衝突相互作用によるフィラメント分子雲形成モデル[24]では、フィラメントの長軸に対してこれを取り巻くように湾曲した磁場構造が予想されており、この描像を裏づける観測も報告され始めている[25, 26]。コア形成モデル[21]や磁気平衡解モデル[27, 28]、フィラメント分裂モデル[29, 30]、分子雲形成モデル[31, 32]などをツールとして、観測された磁場マップを読み解くことができる。

磁力線の歪み方だけでなく、磁場強度も重要な情報である。磁場が強ければ向きがよく揃った磁力線分布(塵による偏光角分布)が、磁場が弱ければ分子雲内の乱流による影響で向きが乱れた磁力線分布が期待される。この原理に基づいた、偏光角揺らぎと領域の磁場強度との関係は、Davis-Chandrasekhar-Fermi法として定式化されている(DCF法[33, 34])。この手法は実際よりも強く磁場強度を見積もることがシミュレーションを用いた研究から分かっており、補正係数が提案されている[35]。また、修正DCF法の提案もある[36, 37]。偏光角揺らぎの測定方法には、湾曲磁

場成分の差し引きによる方法[20, 38]と、構造関数による方法[39-41]とがある。コアに砂時計型の磁場構造が付随する場合には、シンプルなモデルに基づく3次元解析により、磁力線分布の軸対称を仮定するだけで、視線方向の磁場軸の傾き角を推定し、コアごとに全磁場強度を求められる[22]。

磁場強度の測定に基づき、コアの力学的安定性や進化段階について、磁場の効果も含めて議論できる[42]。例えば、コア質量とコアを貫く磁束の比を取り、これを理論的臨界値[43]と比較することで、自己重力収縮に対抗する磁気的なサポートが卓越しているかどうかを調べられる。磁場強度の密度依存性や、コアの質量磁束比の動径分布も議論できる[44]。磁気湾曲の研究とあわせて、これらは現在謎に包まれている星形成の初期段階における磁場の役割を理解するための最も基本的なデータとなると考えられる。B-BOPでの大サーベイにより、分子雲コアとそれを取り巻く磁場の豊かな構造が切り開かれていくことが期待される。

5. 原始星天体の化学組成多様性

原始星は、分子雲コアが重力崩壊することで形成される。大きな角運動量を持ったガスは原始星に直接降着することができないため、星周円盤を形成し、やがてその中で惑星系が形成される。このような一連の星・惑星系形成の過程は、構造形成の過程であると同時に、物質進化の過程でもある。この2つの過程を結びつけることは、星・惑星系形成過程の理解に不可欠であり、また、我々の住む太陽系が持つ豊かな物質的環境の起源に迫る上でも重要である。

原始星天体における物質進化は、ガスや塵の降着によって星間媒質が円盤に持ち込まれることで、その後の惑星系が持つ物質への進化に繋がるため重要である。原始星天体の持つ物質的環境については、1990年代から観測的研究が活発にな

されてきた。その後2010年頃には、低質量原始星を取り巻くエンベロープガスの化学組成に多様性があることが報告された[45]。さらに近年では、ALMAを用いた観測によって、エンベロープガスに埋もれた原始星円盤の詳細な観測が可能になった。これにより、エンベロープスケール(～1,000 AU)から円盤スケール(10–100 AU)までの物理的・化学的描像が明らかにされつつある。

一方で、そもそもこのような化学的多様性がいつ・どのようにして生まれるのかについては、未だ十分に理解されていない。星間空間に存在する氷の分子組成は、紫外線環境によって異なることが知られており[46]、原始星天体の化学的多様性の起源についても、星形成前の分子雲コア時代に生成される氷マントル組成の多様性にまで遡ることが提唱されている[47]。このことは、我々の住む太陽系が持つ豊かな物質的環境の起源が、星形成過程のごく初期まで遡ることを意味し、非常に興味深い。加えて、近年の観測では、同一の分子雲複合体の中でも原始星天体ごとに化学組成に違いが見られることが報告されている[48]。天球面上で分子雲複合体の中心付近に位置する原始星天体は、複合体の縁に位置するものに比べて、飽和有機分子に富む傾向が指摘されている。分子雲複合体の中心付近では縁付近に比べて星間紫外線の遮蔽が強いと考えられ、分子雲スケールでの紫外線環境の違いが原始星天体が持つ化学組成の多様性に反映されている可能性がある。したがって、原始星天体の化学的多様性の起源に迫るには、その母体である分子雲スケールでの環境との関係を探ることが急務である。

分子雲中の原子および分子は、星間紫外線によって電離・解離される。例えば分子雲中において水素分子に次いで存在量の多いCO分子は、炭素(C)原子と酸素(O)原子に光解離され、C原子はさらに炭素イオン(C⁺)へと光電離される。このため、星間紫外線の遮蔽度合いは化学組

成を決める重要なパラメータの1つである。分子雲スケールでの紫外線環境が星・円盤形成スケールの化学組成に与える影響を探るためには、SAFARIを用いた分子雲複合体における[C II]輝線とO原子輝線([O I]; 63および145 μm)のマッピング観測が有用である。[C II], [O I]が強い領域は、星間紫外線がそこでの化学組成に大きな影響を与えていると解釈できる。

これまで、[C II]と[O I]の観測研究は、大質量星近傍の光解離領域で行われてきた。一方、分子雲スケールにおける紫外線環境の違いが、将来形成される星と円盤にどの程度の影響を与えるのかについては、未だ十分に理解されていない。ペルセウス分子雲複合体に含まれる若い原始星天体は、有機分子の組成による化学的多様性がすでに調べられている[48]。この領域について[C II]と[O I]の分布をSPICAで観測することで、分子雲スケールの紫外線環境が原始星天体の化学組成に与える影響を明らかにできる。これにより、原始星形成に伴う化学進化の多様性について、分子雲スケールから円盤スケールまでを繋ぐ理解に迫ることが期待される。

謝辞

誌面の関係でこの原稿の執筆に加われなかった検討班メンバーに感謝します。また検討会の全体を取りまとめてくださった愛媛大学の長尾透さん、国立天文台の野村英子さんには大変お世話になりました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Larson, R. B., 1981, MNRAS, 194, 809
- [2] André, P., et al., 2010, A&A, 518, L102
- [3] Inoue, T., & Inutsuka, S., 2012, ApJ, 759, 35
- [4] Clark, P. C., et al., 2019, MNRAS, 486, 4622
- [5] Iwasaki, K., et al., 2019a, ApJ, 873, 6
- [6] Tachihara, K., et al., 2012, ApJ, 754, 95
- [7] Nakagawa, T., et al., 1998, ApJS, 115, 259
- [8] Pabst, C. H. M., et al., 2017, A&A, 606, A29
- [9] Valdivia, V., et al., 2016, A&A, 587, A76

- [10] Gry, C., et al., 2002, A&A, 391, 675
[11] Goldsmith, P. F., et al., 2010, ApJ, 715, 1370
[12] Nagai, T., et al., 1998, ApJ, 506, 306
[13] Padoan, P., & Nordlund, Å., 1999, ApJ, 526, 279
[14] Inoue, T., & Fukui, Y., 2013, ApJ, 774, L31
[15] Inoue, T., et al., 2018, PASJ, 70, S53
[16] Tomisaka, K., 2015, ApJ, 807, 47
[17] André, P., et al., 2016, A&A, 592, A54
[18] McKee, C. F., & Ostriker, E. C., 2007, ARA&A, 45, 565
[19] Schleuning, D. A., 1998, ApJ, 493, 811
[20] Kandori, R., et al., 2017, ApJ, 845, 32
[21] Myers, P. C., et al., 2018, ApJ, 868, 51
[22] Kandori, R., et al., 2020, ApJ, 888, 120
[23] Li, H.-B., et al., 2015, Nature, 520, 518
[24] Inoue, T., & Fukui, Y., 2013, ApJ, 774, L31
[25] Arzoumanian, D., et al., 2018, PASJ, 70, 96
[26] Tahani, M., et al., 2019, A&A, 632, A68
[27] Tomisaka, K., et al., 1988, ApJ, 335, 239
[28] Tomisaka, K., 2014, ApJ, 785, 24
[29] Hanawa, T., et al., 2017, ApJ, 848, 2
[30] Hanawa, T., et al., 2019, ApJ, 881, 97
[31] Inutsuka, S., et al., 2015, A&A, 580, A49
[32] Iwasaki, K., et al., 2019, ApJ, 873, 6
[33] Davis, L., 1951, Phys. Rev., 81, 890
[34] Chandrasekhar, S., & Fermi, E., 1953, ApJ, 118, 113
[35] Ostriker, E. C., et al., 2001, ApJ, 546, 980
[36] Cho, J., & Yoo, H., 2016, ApJ, 821, 21
[37] Yoon, H., & Cho, J., 2019, ApJ, 880, 137
[38] Girart, J. M., et al., 2006, Science, 313, 812
[39] Hildebrand, R. H., et al., 2009, ApJ, 696, 567
[40] Houde, M., et al., 2009, ApJ, 706, 1504
[41] Cho, J., 2019, ApJ, 874, 75
[42] McKee, C. F., 1989, ApJ, 345, 782
[43] Nakano, T., & Nakamura, T., 1978, PASJ, 30, 671
[44] Kandori, R., et al., 2018, ApJ, 865, 121
[45] Lefloch, B., et al., 2018, MNRAS, 477, 4792
[46] Boogert, A. C. Adwin, et al., 2015, ARA&A, 53, 541
[47] Sakai, N., & Yamamoto, S., 2013, Chem. Rev., 113, 8981
[48] Higuchi, A. E., et al., 2018, ApJS, 236, 52

SPICA Science Case Studies on Star Formation and Interstellar Medium

**Tsuyoshi INOUE, Kazunari IWASAKI, Yoko OYA,
Ryo. KANDORI, Yoshito SHIMAJIRI,
Kengo TACHIHARA, Kenji FURUYA**

Department of Physics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

Abstract: We studied science cases of star formation and interstellar medium in forthcoming SPICA era. Our case study team is composed of fifteen astronomers and physicists. Here, we show some results of the case studies particularly focusing on star formation.