

銀河系の果てに分子の森を見る

下 西 隆

〈新潟大学研究推進機構超域学術院 〒950-2101 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050〉

e-mail: shimonishi@env.sc.niigata-u.ac.jp



私たちの住む銀河系の最外縁部で初めて、生まれたばかりの星とそれを包む有機分子の雲が発見されました。銀河系の外縁部は、銀河系形成初期の原始的な環境を今に残していると考えられています。そのような環境下における化学的に豊かな星間物質の発見は、複雑な有機分子が作られる環境が、宇宙史の比較的初期の段階から存在していた可能性を示唆します。本稿では、過去の宇宙における物質進化を探るうえで鍵となる低金属量星形成領域の星間化学研究について、最新の研究成果を交えて解説します。

はじめに

近年、星・惑星形成領域の化学的多様性・複雑性の理解は大きく進みつつあります。銀河系内の星形成領域では、電波観測や赤外線観測により、100種類を超える様々な星間分子が検出されています。この中には、2-3原子程度の単純な分子から、10原子以上の大型の有機分子まで、多種多様な分子種が含まれています^[1]。水やメタノールなどの化学的に安定な星間分子は、星形成の際に星周円盤へと取り込まれ、惑星系の材料になる可能性もあります。太陽系を含む惑星系に存在する物質の化学的起源を明らかにするためにも、星・惑星形成過程における物質の化学進化史の理解は重要です。

隕石などに含まれる有機物の分析から、太陽系始原物質には、アミノ酸などの生体関連分子をはじめとした400種類以上の有機分子が含まれていることが知られています^[2]。つまり、少なくとも私たちの住む太陽系については、誕生した約46億年前の時点で、化学的に豊かな惑星系材料

物質が存在していたと考えることができます。

では、その当時の銀河系において、有機物に富んだ化学的に豊かな星・惑星系は普遍的に存在したのでしょうか？また、より過去の宇宙において、例えば100億年前の銀河系において、そのような星間物質は存在したのでしょうか？これまでの星形成領域の観測研究で得られた星間分子の化学的多様性に関する知見は、数百万年から数千万年という星形成のタイムスケールを考えると、それはほぼ現在の宇宙の星間物質についての知見です。過去の宇宙における星・惑星材料物質について知るには、過去の宇宙を模擬する環境に存在する天体を観測する必要があります。

低金属量宇宙を研究する狙い

過去の宇宙と共に通する環境を考えるうえで、金属量（重元素量）^{*1}の低さは重要な要因の一つです。ビッグバンで生成された元素は、ほぼ水素とヘリウムだけで、初期の宇宙には炭素、酸素、窒素といった重元素はほとんど存在していなかったと考えられています。重元素は、恒星内部の核融

*1 天文学ではヘリウムより重い元素を金属（重元素）と呼び、それらの水素に対する割合を金属量（重元素量）と呼びます。

合反応などにより生成され、星の死に伴い星間空間へと放出されますので、銀河の金属量は、星の誕生と死の繰り返しにより、過去から現在にかけて増加してきました。

低金属量宇宙における天体の物理・化学過程を研究するとき、何を知りたいか、その狙いによって興味のある金属量の範囲が変わってきます。そしてその狙いは、大きく分けて二つあると私は考えています。

一つは、宇宙の最初期における天体形成を理解したいという狙いです。この場合、金属量がゼロとか、太陽に比べて100分の1とか、それくらいの金属量が重要になってきます。実際、そのような超低金属量環境における星形成過程は興味深く、現在も活発な理論研究が行われています[3-5]。

もう一つは、この宇宙が星形成活動という意味で最も活発だった頃の天体形成・物質進化を理解したいという狙いです。遠方銀河の研究により、宇宙は今から約100億年前あたりの時代で、最も活発に星形成をしていたということがよく知られています[6]。この時代の銀河の金属量は、およそ太陽の1/5から1/10程度であったと考えられています[6-8]。

この金属量範囲は、星形成や星間化学の観測研究を低金属量環境に拡張したいと企む天文学者にとっては嬉しい値です。例えば、銀河系の近傍で活発な星形成をしている系外銀河「大マゼラン雲」の金属量は太陽の約1/3、その近くに位置する「小マゼラン雲」は約1/10です。本稿で焦点を当てる銀河系外縁部も同様の低金属量環境を持ちます（詳細は後述）。

これらの領域の距離の近さも重要です。例えば、複雑な有機分子の多くは原始星近傍の暖かい領域で観測されます。そのような領域を空間分解するには、およそ0.1 pc（パーセク）^{*2}程度の

スケールで観測を行う必要があります。この大きさは、星が生まれる分子雲中の特に密度の高い領域である分子雲コアの典型的な大きさに相当します。例えば50 kpc（キロパーセク）の距離に位置する大マゼラン雲の場合、0.1 pcは約0.4秒角に相当します。この角度分解能（望遠鏡の視力）は、電波干渉計や大口径光学望遠鏡を用いれば十分達成可能な値です。金属量が太陽の1/100以下の分子雲コアを局所銀河群^{*3}内で観測するのは大変難しいですが、金属量1/3から1/10程度の天体であれば、マゼラン雲や銀河系外縁部を対象とした観測で可能で、そのような領域の研究を通して今よりも活発に星形成をしていた頃の宇宙の物質進化を知りたいわけです。

マゼラン雲の星間化学

実際、ここ10年でマゼラン雲を対象とした星間化学の観測研究は大きく進展し、分子雲コアスケールでの星間化学研究は低金属量環境へと拡張されつつあります。アルマ望遠鏡による観測では、星間空間の複雑な有機分子を検出するうえで重要なホットコアと呼ばれる原始星近傍のガス雲（詳細は後述）が大マゼラン雲内に検出され、低金属量環境下でも複雑な有機分子^{*4}が存在することが明らかになりました[9-11]。金属量が約1/10の小マゼラン雲内の分子雲コアでも有機分子（メタノール）が検出されました[12]。また、電波単一鏡による長時間観測では、分子雲スケールで広がった高密度ガスの化学組成の研究が行われました[13-15など]。赤外線観測では、原始星に付随する星間氷の化学組成の研究も行われました[16, 17など]。このあたりの研究の様子については、過去の記事における詳しい解説もご覧下さい[18-20]。

このように低金属量系外銀河の原始星の星間化

^{*2} 天文学でよく用いられる距離の単位。1 pcは約3.26光年（約31兆km）。

^{*3} 銀河系（天の川銀河）の属する銀河の集団のこと。

^{*4} 天文学では、6個以上の原子からなる有機分子を「複雑な有機分子」と呼んでいます。

学研究が進む一方で、銀河系内の低金属環境はどうなっているのだろうか、という疑問は自然と湧いてきます。星周円盤スケールでの観測研究を低金属量へと拡張していく発展性を考慮しても、マゼラン雲より近い銀河系内の低金属量領域は興味深いです。そこで私が次の狙いとしたのが、銀河系の外縁部です。

銀河系外縁部

銀河系の外縁部とは、一般的に銀河中心から13.5 kpc以上離れた銀河の外側の領域を指します(図1)。銀河中心から18 kpc以上と特に離れた領域は、“最”外縁部と呼ばれます。銀河系外縁部の重要な特徴の一つは、金属量が低いことです。

銀河系内の金属量は、銀河中心に近いほど高く、外側に向かうにつれて減少していくことが知られています。外縁部として定義される13.5 kpcから、銀河系の円盤部のほぼ端に相当する20 kpcの間で、金属量は太陽系近傍の1/3から1/10程度まで減少します[21, 22]。星の材料となる水素原

子ガスについても、その密度は20 kpc付近で太陽系近傍の1/10程度まで減少します[23]。

金属量やガス密度の低さから、銀河系外縁部は内側領域と比べて星形成活動が活発でなく、星形成のサイクルがあまり進んでいないと考えられています。この特徴は、銀河系の形成初期に存在していた原始的な環境と共にしているため、銀河系外縁部は過去の低金属量宇宙における星形成・物質進化を探る上で重要な研究対象と考えられています。

近年の赤外線および電波の広域観測データを組み合わせた星形成領域探査により、外縁部では700個以上の新たな星形成領域候補の同定が報告されました[24, 25]。また、多波長の赤外線観測サーベイデータを用いて、200個以上の原始星候補天体も外縁部に同定が報告されています[26]。一方で、外縁部における星間化学の観点からの研究は、近傍の星形成領域やマゼラン雲に比べて進んでおらず、原始星に付随する星間分子の観測に至っては、ほぼ未開拓の状態でした。

最外縁部星形成領域WB89-789のアルマ観測

そこで私たちの研究チームは、銀河系外縁部における星間化学研究を開拓すべく、プロジェクトを開始しました。メンバーは、マゼラン雲の星間化学・星形成の研究を行っている下西(本稿の筆者)、外縁部における星・惑星形成の赤外線・電波観測研究を行っている安井千香子氏(NAOJ)・泉奈都子氏(ASIAA)、星間化学の理論研究を行っている古家健次氏(NAOJ)です。記録によると、2017年に最初の打ち合わせを行ったようです。

私自身、あかり衛星によるマゼラン雲の赤外線サーベイデータの解析で研究者としてのキャリアをスタートさせ、それを基に低金属量原始星の星間化学研究を切り拓いてきましたので、分子雲や赤外線点源のデータがある程度揃ってくれば、そ

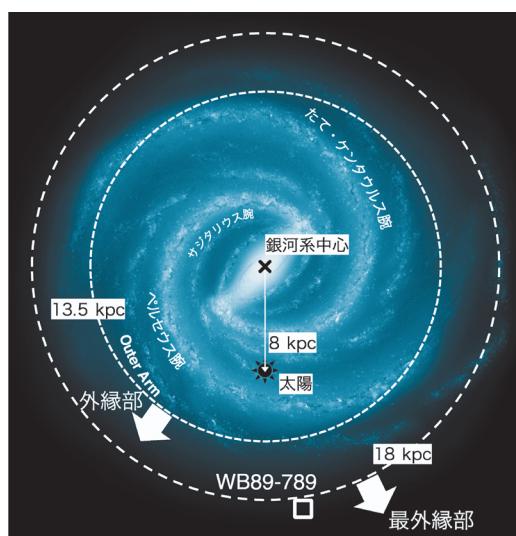


図1 銀河系の想像図。銀河中心は×印、太陽系の位置は星印で示しています。2つの点線は外縁部・最外縁部の範囲、図中の四角は本稿で紹介する最外縁部星形成領域WB89-789の位置を示します。[NASA/JPL-Caltech/R. Hurtに加筆]。

これらを基に星間化学研究に発展させることができるとする目論見はありました。しかし、外縁部はなかなか厄介で、マゼラン雲に比べて利用可能なデータベースが（その当時は）圧倒的に少なかったのです。そこで研究チームは、いくつかの外縁部星形成領域の中から、比較的素性が知られていて、かつ銀河中心から特に離れた面白そうな領域に絞って研究に着手することにしました。三鷹での打ち合わせの結果、WB89-789という領域に目をつけることにしました。

研究のターゲットとなったWB89-789は、銀河系の最外縁部に位置する星形成領域で、銀河中心からは約19 kpc離れています（図1）。銀河の渦状腕^{*5}も届いていない、まさに銀河系円盤部の果ての領域です。銀河中心からの距離より推測される金属量は、太陽の約1/4です。WB89-789領域には、これまでの研究で一酸化炭素の同位体置換種（C¹⁸O）や一硫化炭素（CS）で見える比較的密度の高いガス雲が付随していることが報告されていました。また、近赤外線観測により、ガスやダスト^{*6}にまだ深く埋もれている原始星の候補天体も報告されていました[27]。観測では、これらの原始星候補のうち、特に若さないいくつかの天体に狙いを絞り、アルマ望遠鏡によるサブミリ波領域での高感度・高空間分解能観測を実施しました。アルマ望遠鏡にとどても、最外縁部の星形成領域に対する観測は、（たぶん）我々のプロジェクトが初の試みでした。

銀河系の果ての分子の森

観測の結果、興味深いスペクトルを示す天体が見つかりました[28]。250 GHz帯および350 GHz帯のサブミリ波域に、極めて豊富な分子輝線が検出され、これはこの天体に化学的に豊かな分子ガスが付随していることを意味します（図2）。

検出された30種類以上の分子の中には、エタ

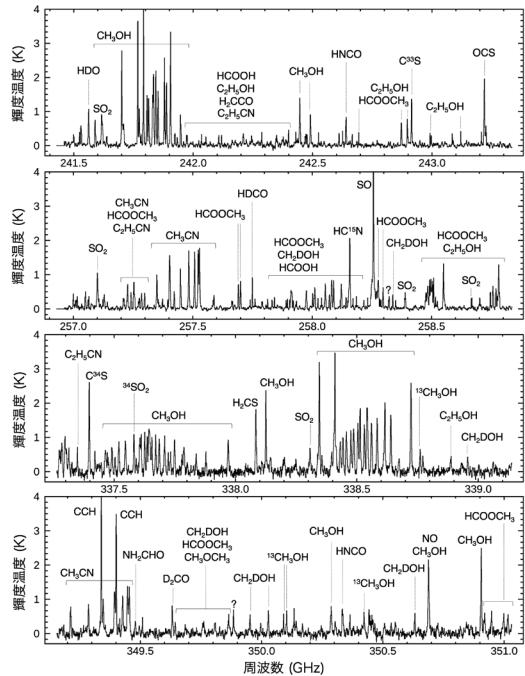


図2 銀河系最外縁部に発見された原始星（WB89-789 SMM1）のサブミリ波スペクトルの一例[28]。このように分子輝線が密集した様子は、line forestとも言われます。縦軸の輝度温度とは、電波天文学において電磁波の放射強度を表す際によく使われる単位です。

ノール（C₂H₅OH）、ギ酸メチル（HCOOCH₃）、ジメチルエーテル（CH₃OCH₃）、アセトアルデヒド（CH₃CHO）などの星間空間では比較的大きな有機分子や、アセトニトリル（CH₃CN）やプロパンニトリル（C₂H₅CN）などの窒素を含む有機分子など、多種多様なものが含まれていました（表1）。また、重水素化された水（HDO）やメタノール（CH₂DOH）、ホルムアルデヒド（HDCO, D₂CO）なども検出され、これらは星形成初期段階の物理状態を知る手掛かりともなります[29]。

分子輝線の分布を見ると、水や有機分子のほとんどは、原始星の近傍（半径約0.015 pc≈3000天

*5 湾曲銀河が持つ渦状の構造、星間物質が集まっている、星形成の主要な場となっています。

*6 固体微粒子。塵とも呼ばれます。

表1 銀河系最外縁部の原始星で検出された星間分子の一覧 [28].

2 atoms	3 atoms	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms	8 atoms	9 atoms
CN	HDO	H ₂ CO	c-C ₃ H ₂	CH ₃ OH	CH ₃ CHO	HCOOCH ₃	CH ₃ OCH ₃
NO	H ¹³ CO ⁺	HDCO	HC ₃ N	¹³ CH ₃ OH	c-C ₂ H ₄ O		C ₂ H ₅ OH
CS	HC ¹⁸ O ⁺	D ₂ CO	H ₂ CCO	CH ₂ DOH			C ₂ H ₅ CN
C ³⁴ S	H ¹³ CN	HNCO	HCOOH	CH ₃ CN			
C ³³ S	HC ¹⁵ N	H ₂ CS		NH ₂ CHO			
SO	CCH						
³⁴ SO	SO ₂						
³³ SO	³⁴ SO ₂						
SiO	OCS						
	¹³ OCS						

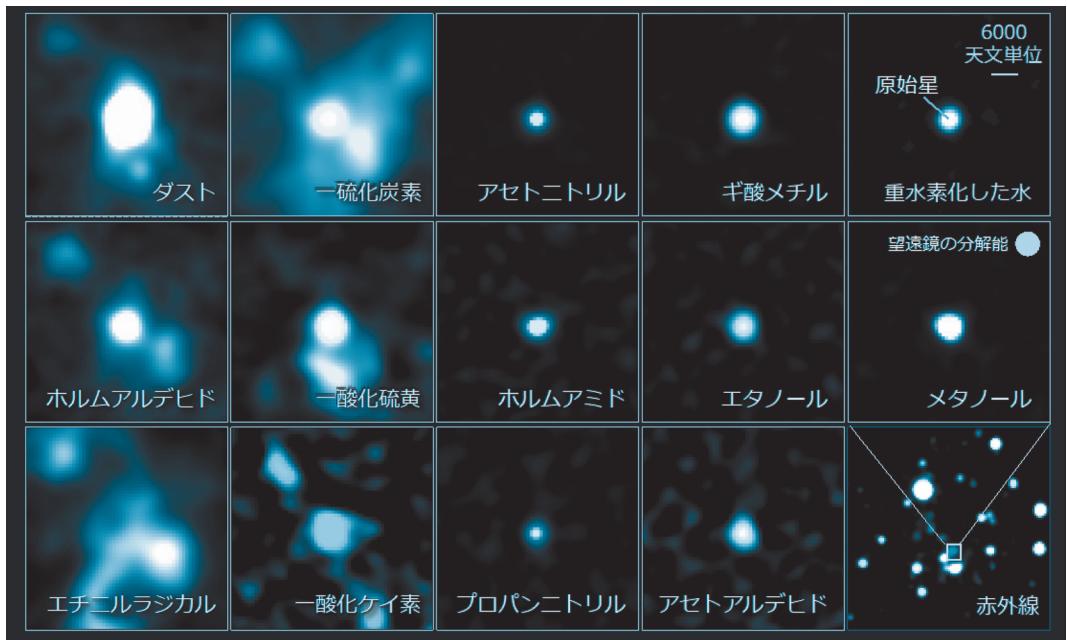


図3 銀河系最外縁部の原始星で観測された分子輝線およびダスト熱放射の強度分布の一例 [28]. 右下には観測した領域の赤外線画像 (1.25 μm および 2.16 μm の合成) を示しています.

文単位の領域) に集中していることもわかりました (図3). このことは、これらの分子種が原始星からの輻射などの影響を受けた暖かい領域に選択的に存在することを示唆します. 実際、分子輝線を用いてガスの励起状態を解析した結果、原始星近傍には 100 K (ケルビン) から 300 K 程度の暖かい分子ガスが付随していることがわかりました. 一方で、一硫化炭素 (CS) やエチニルラジカル (CCH) のような比較的小型の分子は、よ

り広がった分布をしており、温度も低い (40 K 程度) ことがわかりました.

銀河系最外縁部において、原始星やそれを取り囲む有機分子の雲が検出されたのは今回が初めてです. 原始星近傍に付随する化学的に豊かな暖かい分子ガスの雲、これはまさにホットコアと呼ばれる天体の特徴と一致します [30].

通常、星が形成される分子雲コアは、極めて低温 (約 20 K 以下) であるため、炭素・窒素・酸

素などを含む分子の大部分は氷^{*7}の状態で存在しています。星が誕生し、周囲の物質が温められはじめると、これらの氷は溶け、ガスの状態で放出されます。また、この過程において、ダスト表面での化学反応などを介して、より複雑な有機分子が生成されると考えられています[31, 32]。星形成天体の雪解けともいえるこのような現象は、付随する物質をより化学的に複雑にします。単純な分子から大型の分子まで様々な分子が検出されることから、ホットコアは星間化学における重要な研究対象の一つとなっています。

過去の宇宙の星・惑星系は化学的に複雑であったか

今回発見された最外縁部ホットコアの化学組成を、銀河系の内側にある同様の天体のものと比較した結果を図4に示します。ホットコアで見られる複雑な有機分子の化学組成を比較する際は、メタノール(CH_3OH)の柱密度^{*8}を用いて規格化した存在比がよく使われます[31, 33]。その主な理由は、(1) メタノールがより大きな有機分子を作るうえで材料となると考えられているから、(2) 星形成領域の有機分子の中ではメタノールが最も存在度の高い分子だから、(3) 高温のメタノールは主にホットコア領域(氷が昇華している領域)から生じていて、領域のガス密度の指標になるから、などです。

図4が示すように、複雑な有機分子のメタノールに対する存在割合は、銀河系最外縁部の低金属量ホットコアと、内側領域の太陽金属量ホットコアの間で、非常に類似していることがわかりました。これは、銀河系最外縁部のような重元素が少ない原始的な環境においても、複雑な有機分子が銀河系の内側と同じような効率で生成されていることを示唆します。また、メタノールは、低金属

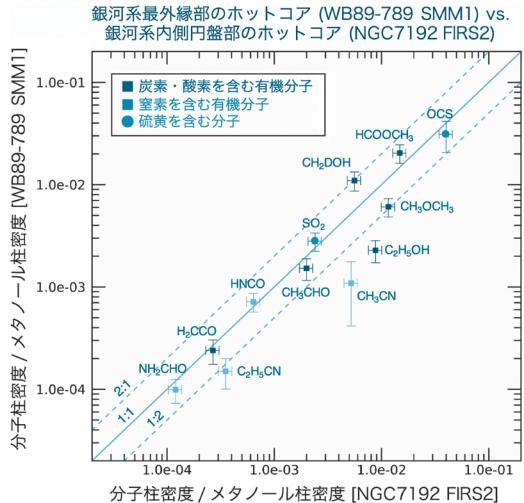


図4 銀河系最外縁部のホットコアと、内側円盤部にあるホットコアの化学組成の比較[28]。メタノールの柱密度に対する存在比が比較されています。最外縁部と内側では環境が大きく異なりますが、ホットコアにおける大型の分子の存在比はよく似ていることが示されています。実線と点線は、2天体間の存在比が2:1, 1:1, 1:2となる線です。

量環境においても、より大型の有機分子生成の材料として重要であることも示唆しています。

WB89-789領域の金属量(太陽の約1/4)は、おおよそ80億年前の銀河の典型的な金属量に相当します[6, 7]。今回の結果は、複雑な有機分子が作られる環境は、太陽系が生まれるよりもずっと前の段階から存在していた可能性を示唆しています。

それでは、低金属量環境において、複雑な有機分子に富んだ天体へと進化するために必要な条件とは何でしょうか。大型の有機分子の材料となり得るメタノールは、星形成の初期段階において、星間ダストの表面における化学反応により生成されることが知られています[34]。気相での生成反応は効率的ではありません。つまり、ホットコア

*7 分子雲内部の低温・高密度領域では、ダストの表面に気体の原子・分子が吸着し、氷が生成されます。これらは星間氷と呼ばれています。ダスト表面での化学反応は、星形成領域における重要な分子生成メカニズムの一つです。

*8 視線方向に沿って積分した単位面積当たりの物質の量。

段階で観測されるメタノールの大部分は、それよりもずっと前の進化段階で生成され、氷として蓄えられた分子が昇華したものを見ているわけです。

マゼラン雲内の低金属量ホットコアの化学進化に焦点を当てた星間化学の数値シミュレーションでは、星形成初期段階の分子雲の遮蔽度が低い(=ダストの温度が高い)場合は、メタノールの生成反応が効率的に進まず、ホットコア段階においてもメタノールの存在度が著しく低下することが報告されています[11, 35]。これは、ダスト表面でのメタノールの生成反応(一酸化炭素に対する水素付加反応)が、温度に敏感なことに起因しています。すなわち、暖かすぎるダストの上では、揮発性の非常に高い水素原子が表面からすぐにいなくなってしまい、反応が抑制されるわけです。実際、低金属量かつ強い星間輻射場のため分子雲の温度が高くなりやすいことが考えられる大マゼラン雲では、メタノールが著しく欠乏したホットコアが発見されています[9]。

今回見つかった最外縁部のホットコアは、星形成の初期段階において、メタノールが効率的に作られるような冷たいフェーズを十分な時間経験していた可能性が考えられます。今回の天体で、重水素を含む分子の割合が比較的高いことも、この考えを支持します[28]。

しかし、まだ多くの謎は残ります。例えば、メタノールより大型の有機分子については、その生成経路が明らかになっていないものが多くあります。メタノールを材料としたこれらの大型有機分子の生成が、どのように金属量環境に影響を受けるのかは、より発展的な研究が必要です。また、先に述べた星形成初期段階の温度という факторは、ホットコア段階の有機分子存在比に影響する要因の一つに過ぎません。星形成のタイムスケール、星間輻射場、宇宙線強度の違いによる影響などを考慮した、より多角的な星間化学シミュレーションが必要です。今後の理論研究・実験研

究の進展にも期待です。

おわりに

私たちの住む太陽系に見られるような有機物に富んだ姿は、宇宙史を通じてありふれていたのでしょうか？

今回発見された天体については、様々な有機分子が検出されました。このような化学的に豊かな姿が、銀河系の外縁部にある他の原始星にも見られるかどうかはまだ分かりません。また、どのような条件が揃えば、複雑な有機分子に富んだ物質をまとう原始星へと進化していくのかもまだよく分かっていません。今後、低金属量環境下の原始星の探査および付随する物質の観測が進めば、原始的な環境下における星形成・物質進化の詳細な様子が、より多くの天体について明らかになることが期待されます。

この記事を書いている時点でも、外縁部の星間化学研究については次々と新たな結果が報告されつつあります。私たち自身のプロジェクトについても、銀河系外縁部やマゼラン雲を対象として、アルマ望遠鏡や大口径光学望遠鏡を用いた原始星の探査観測が進行中です。低金属量星間化学の研究がより一層盛り上がっていく気配を感じています。

謝 辞

本稿の内容は、筆者らが発表した論文[28, 36, 37]に基づいています。共著者の泉氏、吉家氏、安井氏に深く感謝いたします。それぞれの専門性が大いに活きたとても良いチームだと思います。また、銀河系外縁部の研究へとつながった、マゼラン雲の星間化学研究[9, 11, 12, 15, 16]において、大きなお力添えを頂いた共同研究者の皆様にも深く感謝申し上げます。アルマ望遠鏡の関係者の皆様にもこの場を借りてお礼申し上げます。最後に、本稿執筆の機会を与えてくださった編集委員の江草英実氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] McGuire, B. A., 2018, ApJS, 239, 17
- [2] 蔡田ひかる, 2010, 日本惑星科学会誌, 19, 1
- [3] 大向一行, 2006, 天文月報, 99, 462
- [4] 細川隆史, 2013, 天文月報, 106, 772
- [5] 千秋元, 2017, 天文月報, 110, 282
- [6] Madau, P., & Dickinson, M., 2014, ARA&A, 52, 415
- [7] Buser, R., 2000, Science, 287, 69
- [8] Rafelski, M., et al., 2012, ApJ, 755, 89
- [9] Shimonishi, T., et al., 2016, ApJ, 827, 72
- [10] Sewilo, M., et al., 2018, ApJ, 853, L19
- [11] Shimonishi, T., et al., 2020, ApJ, 891, 164
- [12] Shimonishi, T., et al., 2018, ApJ, 862, 102
- [13] Heikkilä, A., 1999, A&A, 344, 817
- [14] Wang, M., et al., 2009, ApJ, 690, 580
- [15] Nishimura, Y., et al., 2016, ApJ, 818, 161
- [16] Shimonishi, T., et al., 2016, A&A 585, A107
- [17] Seale, J. P., 2011, ApJ, 727, 36
- [18] 下西隆, 2017, 天文月報, 110, 386
- [19] 西村優里, 2018, 天文月報, 111, 225
- [20] 下西隆, 2020, ISAS ニュース, 470, 5
- [21] Fernández-Martín, A., et al., 2017, A&A, 597, A84
- [22] Arellano-Córdova, K. Z., et al., 2020, MNRAS, 496, 1051
- [23] Wolfire, M. G., et al., 2003, ApJ, 587, 278
- [24] Izumi, N., et al., 2017, AJ, 154, 163
- [25] 泉奈都子, 2016, 天文月報, 109, 851
- [26] Winston, E., et al., 2020, AJ, 160, 68
- [27] Brand, J., & Wouterloot, J. G. A., 2007, A&A, 464, 909
- [28] Shimonishi, T., et al., 2021, ApJ, 922, 206
- [29] 古家健次, 2018, 天文月報, 111, 41
- [30] van Dishoeck, E. F., & Blake, G. A., 1998, ARA&A, 36, 317
- [31] Herbst, E., & van Dishoeck, E. F., 2009, ARA&A, 47, 427
- [32] Garrod, R. T., et al., ApJS, in press, arXiv:2110.09743
- [33] Drozdovskaya, M. N., et al., 2019, MNRAS, 490, 50
- [34] Watanabe, N., & Kouchi, A., 2002, ApJ, 571, L173
- [35] Acharyya, K., & Herbst, E., 2018, ApJ, 859, 51
- [36] <https://www.niigata-u.ac.jp/news/2021/97383/> (2022. 01.13)
- [37] <https://alma-telescope.jp/news/press/hotcore-202112> (2022.01.13)

The Discovery of Molecular Complexity at the Edge of our Galaxy

Takashi SHIMONISHI

Center for Transdisciplinary Research, Niigata University, Ikarashi-nincho 8050, Nishi-ku, Niigata, Niigata 950-2181, Japan

Abstract: For the first time, astronomers have detected a newborn star and the surrounding cocoon of complex organic molecules at the edge of our Galaxy, which is known as the extreme outer Galaxy. The results suggest that the interstellar conditions to form the chemical complexity might have persisted since the early history of the Universe. This article overviews recent observational studies of interstellar chemistry in low-metallicity star-forming regions.