

ALMAによる銀河系外ホットコアの初検出

下 西 隆

〈東北大学 学際科学フロンティア研究所 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: shimonishi@astr.tohoku.ac.jp



ホットコアは、大質量星の形成に伴い原始星の周囲に形成される高密度で暖かい分子ガスの塊です。ALMAを用いた観測により、初めて銀河系外にホットコアが検出されました。大マゼラン雲に発見されたこのホットコアは、天の川銀河内のホットコアとは異なる化学組成を示し、重元素量が低い環境下に存在する星間分子の化学過程に関する重要な知見を含んでいます。本稿では、宇宙における星や惑星の材料物質の化学的多様性の一端を示したこの最新の研究結果の概要を説明すると共に、アストロケミストリーの観点からの銀河系外原始星の研究について展望します。

1. はじめに

宇宙には私たちの住む天の川銀河以外にも、一千億以上の銀河があるといわれています。これらの銀河はそれぞれ異なる個性をもちますが、星や惑星の形成、そしてそれに伴う物質の化学的進化といった現象は、どの銀河においても起こります。しかし、系外銀河の星・惑星形成領域における物質の化学的性質は、いまだ多くが謎に包まれています。

近年、銀河系外原始星の観測の進展により、この状況は変わりつつあります。まず赤外線観測の分野では、日本の赤外線天文衛星「あかり」や米国のSpitzer宇宙望遠鏡の活躍により、天の川の近傍に位置するマゼラン雲の大質量原始星の分光観測が大規模に行われました^{1), 2)}。その結果、天の川とは環境の異なる銀河では、原始星周囲に存在する氷の化学組成が異なることが明らかにされました³⁾。

一方、電波観測の分野では、ALMAの登場により、アストロケミストリー^{*1}の観点からの銀

河系外原始星の研究は、気相の分子へと拡大されつつあります。これまで天の川銀河内の天体にしかできなかった観測が、銀河系外の天体についても同様の空間分解能^{*2}で行えるようになり、銀河系外アストロケミストリーの研究は今新たな局面を迎えつつあります。本稿では、今まさに黎明期にあるこの分野の研究について、筆者らの最新の観測結果⁴⁾を交えながら紹介をしていきます。

まずは本稿を読む上で大切な三つのキーワード、「銀河の重元素量」、「マゼラン雲」、「ホットコア」について簡単に説明をします。

1.1 重元素量とアストロケミストリー

系外銀河の星間物質の研究を行ううえでの重要な目的の一つは、銀河の環境の違いが星間物質の物理的・化学的な性質にどのような影響を与えるかを明らかにすることです。年齢や形状など、銀河を特徴づけるパラメータはいろいろとありますが、筆者らの研究ではその中でも特に、銀河の重元素量（または金属量とも言います）に焦点を当てて星間物質の化学的性質の研究を行っています。

私たちの体を作る重元素（天文学ではヘリウム

*1 AstronomyとChemistryが融合した研究分野。

*2 望遠鏡の視力。これが高いほど天体の空間構造を細かく分解して見ることができる。

より重い元素のことを指します)は、恒星内部の核融合反応によって生成され、星の終末期に起こる質量放出現象によって星間空間へと供給されていきます。そのため、星の誕生と死のサイクルが多く繰り返されるほど、星間空間の重元素量は増加していきます。つまり、宇宙の化学的進化とは、単純化して考えると重元素量の進化(増加)であると捉えることができます。このことから、重元素量の低い環境下にある星・惑星形成領域のガス・ダスト(星間塵)・氷などの化学的性質を調べることは、より遠くの宇宙初期に近い銀河の星間物質における化学過程を探るうえで重要な役割を担っています。

1.2 マゼラン雲

では、重元素量の低い環境下にある星や惑星の材料物質を観測するにはどうすればよいでしょうか。方法はいろいろとありますが、ここで重要な役割を担う天体の一つが、冒頭でも出てきたマゼラン雲です。大・小マゼラン雲は、それぞれ地球から50,60キロパーセク^{*3}の距離にある矮小銀河で、活発な星形成を起こしている銀河の中では最も天の川銀河に近い銀河です⁵⁾。距離が近いおかげで、個々の星を分解した観測が可能です。

マゼラン雲の重要な特徴として、重元素量が低いということが挙げられます(大マゼラン雲は天の川銀河の約1/3,小マゼラン雲は約1/10)⁵⁾。そのため、マゼラン雲内の星間物質の観測は、低重元素量環境下での物質進化を探る手がかりとなります。

それでは、マゼラン雲内の天体から低重元素量環境下のアストロケミストリーの知見を得るにはどうしたらよいでしょうか。これまでの銀河系内の天体の研究では、化学的に豊かでさまざまな分子輝線が検出される天体、例えばホットコアのような天体から、星間分子の化学過程に関する多くの重要な知見が得られてきました。それならば、マゼラン雲でも同じことをすれば良いのです。

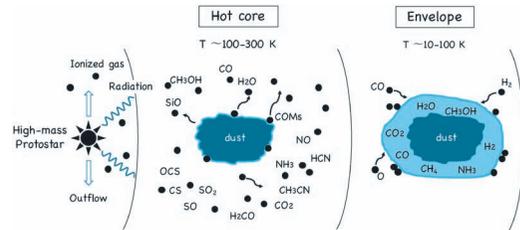


図1 ホットコアの概念図。分子雲中で生成された氷が、星形成活動に伴う温度上昇により昇華し、暖かく高密度の分子ガスを含む領域が大質量原始星の周囲に形成されます。

1.3 ホットコア

ホットコア(Hot coreまたはHot molecular core)とは、大質量星(一般に太陽の8倍以上の質量をもつ星を指します)の形成に伴い原始星の周囲に形成される暖かい分子ガスを多量に含む領域のことです(図1)。

星形成の現場である分子雲には、星や惑星の材料となるガスやダストなどの物質が大量に存在しています。分子雲の中でも特に密度の高い領域は分子雲コアと呼ばれ、星の形成はこの分子雲コアの中心部で起こると考えられています。分子雲コアは、一般的に極めて低温(摂氏マイナス260度以下)であるため、ダストの表面にはさまざまなガスが吸着します。吸着した原子・分子は、ダスト表面で化学反応を起こし、気相反応では効率的に作られにくい分子種(例えば水や二酸化炭素、メタノールやアンモニアなど)を生成し、これらはダストを包む氷となります⁶⁾。

しかし、星が誕生して周囲の物質が暖められ始めると、これらの氷は昇華^{*4}し、ガスの状態で放出されます。その結果、星の周りに暖められた分子ガスが高密度で存在する領域が形成されます。このときの典型的なガス温度は100-300ケルビン程度、水素分子密度は 10^6 cm^{-3} 以上程度と考えられています⁷⁾。このような生まれただけの星を繭のように包む暖かい分子の雲がホットコ

*3 1パーセクは約3.26光年, 1光年は約9.5兆km。

*4 固体が直接気体になること。

アです。天の川銀河の中では、例えばオリオン座の方向にあるオリオンKL領域にホットコアをもつ原始星が存在していることが知られています。

ホットコアには、一酸化炭素のような分子雲に一般的に存在する単純な分子から、水や大型有機分子*5などのなんだか面白そうな分子まで、多様で豊かな分子ガスが存在していることが観測的に明らかになっています⁸⁾。この豊かな化学組成は、分子雲時代の固相の化学、そして暖かい高密度ガス中での気相の化学の双方を反映しており、ホットコアはアストロケミストリーの研究において重要な研究対象の一つとなっています。

2. ALMAによる大マゼラン雲のホットコアの観測

さて、三つのキーワードを紹介したところで、重元素量の低い銀河であるマゼラン雲にあるホットコアがあれば、私たちにアストロケミストリーの新たな知見を与えてくれそうな予感がしてきました。しかし、これまでホットコアの観測は、望遠鏡の性能不足、そして適した観測ターゲットの不足により、私たちの住む天の川銀河内の天体のみに限られていました。

ではここからは、最新の研究結果の話に移りましょう。ここで紹介する研究⁴⁾により、私たちは初めて系外銀河(大マゼラン雲)の中にホットコアを発見し、銀河系外ホットコア研究の第一歩を踏み出したのです。

2.1 ターゲット探し

天の川銀河内の天体であれば、有名な星形成領域はある程度知られており、化学的にどの天体が面白そうかという目処は立ちます。しかし、銀河系外はホットコアの研究にとって未開拓の地。まずはターゲットとなる原始星選びから始めなければ

なりません。

原始星は分子雲に深く埋もれており、ダストの熱輻射に起因する赤外線で明るく輝くため、一般的に原始星の探査には赤外線データが使われます。前述の「あかり」衛星やSpitzer宇宙望遠鏡、さらに欧州のHerschel宇宙望遠鏡などの活躍により、大マゼラン雲内の天体については近・中間・遠赤外線の幅広い波長域で赤外線測光カタログ*6が公開されています⁹⁾⁻¹¹⁾。これらのカタログを用いた大マゼラン雲全域での原始星探査の研究も既に行われています。しかし、カタログ化されている大質量原始星候補だけでも、大マゼラン雲内には約300天体が報告されています²⁾。ALMAですべてを観測するのは今のところ現実的ではありません。

そこで筆者らが活用したのが、原始星の赤外線スペクトルデータです。原始星の赤外線スペクトルには、氷・ダスト・電離ガスなど、原始星の周囲に存在するさまざまな物質の情報が含まれています。その中でも特に「あかり」により取得された原始星周囲の氷の近赤外線吸収バンドの情報は重要な役割を果たしました³⁾。

前述のとおり、ホットコアの特徴的な化学組成は、原始星の形成に伴い、分子雲時代に蓄えられた氷が気相に昇華することにより引き起こされます。一方、原始星の進化が進みすぎてしまうと、星周囲のガス・ダストが散逸し、大規模なH II領域が形成され、結果として分子の大部分は解離し、電波で輝線を観測することが難しくなってしまいます。そこで筆者らは、赤外線のスペクトルデータを見ながら、氷はやや溶けているが溶けすぎている、という微妙な進化段階の大質量原始星を選び、観測を行いました。

2.2 ALMAでの観測結果

ALMAによるサブミリ波観測の結果、ターゲッ

*5 天文学では慣例的に、炭素・酸素を含む6個以上の原子をもつ分子(例 メタノール, CH₃OH)を大型有機分子と呼んでいます。

*6 測光カタログとは、星の明るさなどをまとめた一覧表のことです。「あかり」による大マゼラン雲の赤外線カタログについては、天文月報2009年10月号の板由房氏の記事で詳しく解説されています。

トとした三つの大質量原始星のうちの一つ、ST11という名の天体から、10種類以上のさまざまな分子種からの輝線が多数検出されました(図2)。

図3に示すのは、ST11から検出された分子輝線およびダストからの放射の空間分布です。中間赤外線(10ミクロン)およびサブミリ波(840ミクロン)の連続光の分布は、それぞれ原始星からの放射により加熱された数百ケルビン程度の暖かいダストと、その外側にある数十ケルビン程度の冷たいダストの分布を示しています。放射源である原始星はこれらの連続光源の中心付近に存在していると考えられます。一方、分子からの輝線を見ると、これらはどれも原始星に強く付随し、かつほとんどが原始星から0.1パーセク程度の範囲でコンパクトな分布をしていることがわかります。

また、これらの空間的な情報に加えて、取得されたデータにはガスの温度や密度といった物理状態に関する情報も含まれています。筆者らは、二酸化硫黄(SO_2)およびその同位体置換体種からの輝線が数多く検出されていることに着目し、分子ガスの温度を求める解析を行いました。その結

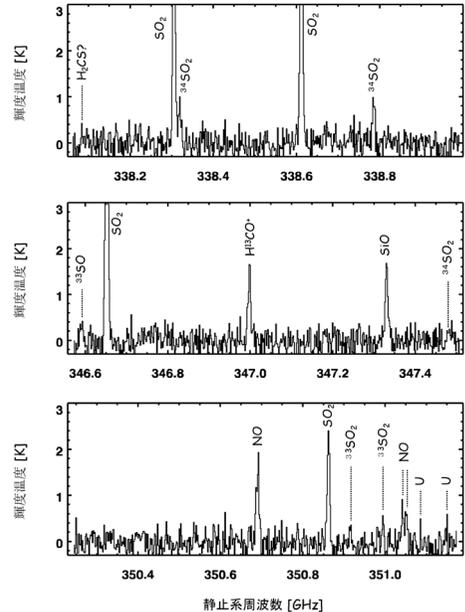


図2 ALMAにより発見された大マゼラン雲のホットコアST11のサブミリ波スペクトルの一例。取得されたデータは分子ガスの柱密度や温度、空間分布などを探るのに用いられました(本文2.2節を参照)。

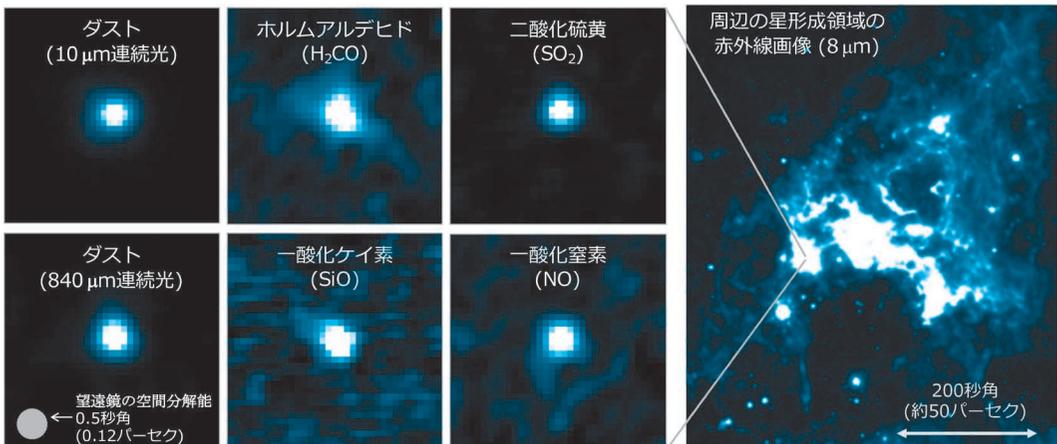


図3 左図: 大マゼラン雲のホットコアST11からの電磁波放射の強度分布の一例(今回のALMAによる観測の0.5秒角という空間分解能は、大マゼラン雲の距離での実スケールに換算すると0.12パーセクに相当します)。原始星にコンパクトに付随するダストおよび分子ガスからの放射が示されています。左上の10ミクロンの画像はGemini South望遠鏡にて観測した画像です。右図: ホットコアを取り巻く周囲の星形成領域の赤外線画像(NASA/Spitzer望遠鏡による8ミクロンデータ)。

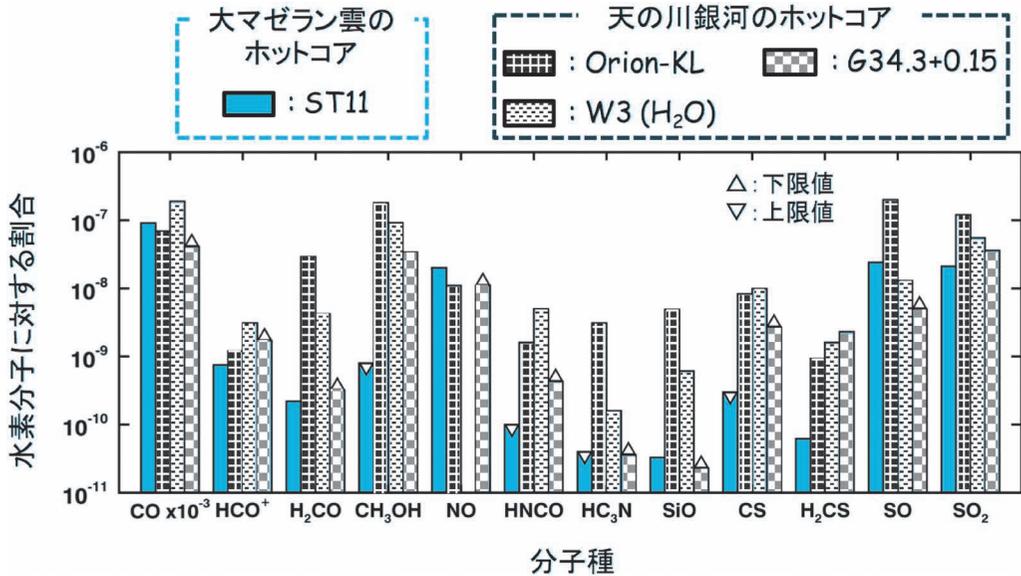


図4 電波スペクトルから導出されたホットコアの分子ガス組成を、大マゼラン雲の天体と天の川銀河の天体と比較したヒストグラム。詳細な説明は本文3章を参照。

果、この原始星の周囲には100-200ケルビン程度の暖かい分子ガスが存在していることが明らかになりました。さらに、ダストのサブミリ波放射の強度を用いた解析から、原始星の周囲には水素分子数密度として少なくとも 10^6 cm^{-3} 以上の高密度ガスが存在していることがわかりました。

このような一連の観測・解析で明らかになったST11の特徴、つまり大質量原始星に付随したコンパクトで暖かい高密度な分子ガスの塊の存在、これはまさにホットコアの特徴と一致します。ST11は初めて銀河系外に発見されたホットコアであり、つまりは現在までに私たちが目にした最も遠い場所にあるホットコアです。ALMAのもつ高い空間分解能と感度は、これまで銀河系内の天体にしかできなかった観測を、銀河系外の天体に拡張することを可能にしました^{*7}。

3. 大マゼラン雲のホットコアの化学組成

それでは、銀河の重元素量の違いは、星間分子の化学組成に何か違いをもたらすのでしょうか。筆者らは、ALMAにより得られたデータを用いて大マゼラン雲のホットコアにおける分子の存在量を導出し、これを天の川銀河内のホットコアのデータと比較しました。その結果、銀河の環境の違いが、ホットコアの化学組成に大きな影響を与えていることを明らかにしました。

3.1 分子雲時代の氷の化学がもたらす影響

図4に示すのは、今回発見された大マゼラン雲のホットコアの化学組成と銀河系内のホットコアの化学組成を比較したヒストグラムです。まず顕著な違いとして挙げられるのは、大マゼラン雲のホットコアでは、メタノール (CH_3OH) やホル

*7 例えば国立天文台のサブミリ波単一鏡ASTEにより、地球から1キロパーセク（一部の例外を除いて多くの大質量星形成領域はこれより遠くに位置しています）の距離にあるホットコアを観測したとき、本稿で紹介しているALMA観測の設定で大マゼラン雲のホットコア（距離は約50キロパーセク）を観測したときには、ほぼ同じ空間スケール（約0.1パーセク）を見ることになります。

ムアルデヒド (H_2CO), イソシアン酸 (HNCO) といった有機分子が少ないという点です。特にメタノールに関しては、天の川銀河内のホットコアでは強い輝線が検出される周波数域でも、輝線は検出されませんでした。

大マゼラン雲は重元素量が低い銀河ですので、炭素や酸素の元素存在量（前述のとおり大マゼラン雲の場合は天の川銀河の約三分の一）に応じて分子の量が少なくなるのは自然なことです。しかし、ST11における上述の分子の存在量は、天の川銀河内のホットコアに比べて約十分の一から千分の一程度の大きな減少を示しており、これはつまり分子の材料の違いだけではその化学組成が説明できないということを示しています。

では、なぜ大マゼラン雲のホットコアは異なる化学組成をもつのでしょうか。筆者らは、分子雲内での化学反応の違い、特にホットコアが形成される前段階の分子雲時代で進む氷の生成反応の違いが、大きく寄与していると考えています。

大マゼラン雲のホットコアで特に存在量が低いメタノールは、大部分がダスト表面上での化学反応により氷として生成されます。メタノール生成の場合、一酸化炭素に水素原子をくっつけていく反応（水素付加反応と呼ばれています）が重要な役割を果たすと考えられています。しかし、水素原子はダスト表面に吸着する力が弱いために、ダストの温度が高くなるとすぐに昇華し、ダスト上からいなくなってしまう。その結果、比較的暖かいダスト上（およそ20ケルビン前後）では、一酸化炭素の水素付加反応の効率が急激に低下し、メタノール氷の生成効率が減少することが化学モデル計算および表面反応の実験により示唆されています^{12), 13)}。ホルムアルデヒドおよびイソシアン酸についても同様に、ダスト表面上での一酸化炭素の水素付加反応がその生成に寄与すると考えられています。

大マゼラン雲は、重元素量が低いために星間空

間のダスト含有量が少なく、また星形成活動が活発であるという要因も重なって、星間輻射場が強いことが知られています。星間輻射場の強さは、分子雲内のダスト温度上昇につながり、実際に大マゼラン雲では銀河内のダスト温度が高いことが観測的に示唆されています¹⁴⁾。つまり、上で述べたような暖かいダスト上での氷化学^{*8}が起りやすい環境であるといえます。

実際に、筆者らが行った赤外線分光観測により、大マゼラン雲の大質量原始星周囲では、天の川銀河内の同様の天体に比べて、メタノール氷の存在量が低いことが報告されており、暖かい氷化学を支持する結果が得られています¹⁵⁾。ホットコアの分子ガスの大部分は、氷の昇華により供給されますので、分子雲時代に記憶された氷の化学組成は、昇華後のガスの化学組成にも強く反映されると考えられます。

このように、銀河の環境の違いが分子雲内での氷の化学に影響を与え、それが大マゼラン雲のホットコアにおけるユニークな化学組成につながった、というのが現在筆者らの提唱している描像です。しかしながら、銀河系外ホットコアの観測はこれが一例目。今後の観測サンプルの増加により、筆者らの仮説を支持するまたは覆す結果が次々と報告されるくらいこの分野の研究を盛り上げていかねばなりません。

3.2 残る多くの謎

一方、ほかの分子に目を向けてみると、大マゼラン雲のホットコアの性質にはまだ多くの謎が残されています。例えば、今回の観測で多くの輝線が検出された二酸化硫黄 (SO_2) の存在量は、大マゼラン雲における硫黄原子の存在量だけでうまく説明ができ、化学反応の違いは目立っては見えていません。また、一酸化窒素 (NO) は、分子の材料となる窒素原子が大マゼラン雲で少ないにもかかわらず、ST11では天の川銀河内の天体と比べて一酸化窒素の存在量が多いという結果が得

*8 筆者らはこれを Warm Ice Chemistry と呼び、重元素量が低い環境での分子生成を理解するうえで重要な要素の一つであると考えています。

られています。現状の理論モデルはこれらの振る舞いを統一的に説明することはできていません。

また、大マゼラン雲で著しく存在量が低いことが明らかになったメタノールは、星・惑星形成領域において、より複雑で大型の有機分子を作る種となると考えられています^{8), 16)}。種となる分子の欠乏は、これを元にして作られるより大きな分子の減少の可能性を示唆します。しかし、残念ながら今回の研究では、観測周波数域の制約により、大型有機分子についての十分な調査はできていません。重元素量が低かった過去の宇宙において、大型の有機分子や複雑な生命素材物質は存在しえたのか、または現在の星形成領域で見られているものとは異なる種類の有機分子が存在していたのか、今後の研究の進展によりこれらの謎が解き明かされることが期待されます。

4. おわりに

重元素量の違いが引き起こす銀河環境の変化により、作られやすくなる分子、作られにくくなる分子、そして影響を受けにくい分子、少しずつこれらの正体が明らかになりつつあります。

星・惑星形成領域における物質の化学過程の特徴を、宇宙の時代ごとに記述することができれば、私たちはこの宇宙の、そして星や惑星の材料となる物質の化学的多様性をより深く理解することができるようになるでしょう。このためには、固相・気相の両面から星・惑星形成領域における化学過程を理解し、銀河の重元素量と星間物質の性質の関連性を明らかにすることが重要な役割を担います。

系外銀河、特にマゼラン雲のように重元素量の低い銀河のアストロケミストリーの研究は、まさに今が黎明期にあります。今後の研究の発展には、赤外線および電波観測の進展のみならず、銀河環境の違いを考慮した化学モデル計算の充実、そして実験室における物理・化学過程の理解をはじめとして、観測天文学だけに捉われない幅広い視点からの研究がかぎを握っています。

謝辞

本稿は筆者らが2016年に発表した論文⁴⁾の内容に基づいています。共著者である尾中敬氏、河村晶子氏、相川祐理氏に感謝いたします。また、観測に携わったALMA関係者の方々にも深く感謝いたします。本稿で紹介したALMAによる観測を立案するうえで、「あかり」により得られた大マゼラン雲の撮像・分光データは欠かせないものでした。「あかり」プロジェクト関係者の皆様にも深く感謝いたします。本研究は、JSPS科学研究費補助金(15K17612)の助成を受けています。

参考文献

- 1) Shimonishi T., et al., 2013, AJ 145, 32
- 2) Seale J. P., et al., 2009, ApJ 699, 150
- 3) Shimonishi T., et al., 2010, A&A 514, A12
- 4) Shimonishi T., et al., 2016, ApJ 827, 72
- 5) Westerlund B. E., 1990, A&ARv 2, 29
- 6) Boogert A. C., et al., 2015, ARA&A 53, 541
- 7) van der Tak F. F. S., 2004, in Proc. IAU Symp. 221, 59
- 8) Herbst E., van Dishoeck E. F., 2009, ARA&A 47, 427
- 9) Kato D., et al., 2012, AJ 144, 179
- 10) Meixner M., et al., 2006, AJ 132, 2268
- 11) Meixner M., et al., 2013, AJ 146, 62
- 12) Acharyya K., Herbst E., 2015, ApJ 812, 142
- 13) Watanabe N., et al., 2003, ApJ 588, L121
- 14) Aguirre J. E., et al., 2003, ApJ 596, 273
- 15) Shimonishi T., et al., 2016, A&A 585, A107
- 16) Nomura H., Millar T. J., 2004, A&A 414, 409

The First Detection of an Extragalactic Hot Molecular Core

Takashi SHIMONISHI

Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University, 6-3 Aramaki Aza Aoba, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: We have discovered a 'hot molecular core,' a cocoon of molecules surrounding a newborn massive star, for the first time outside our Galaxy based on radio observations of the Large Magellanic Cloud (LMC) with ALMA. The observations have revealed that the hot molecular core in the LMC shows significantly different chemical compositions as compared to similar objects in our Galaxy. This article overviews a new challenge in extragalactic astrochemistry.