

低質量原始星天体における暖かい 炭素鎖化学の提唱とその進展



坂井南美

〈東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

e-mail: nami@taurus.phys.s.u-tokyo.ac.jp

「生命の存在する太陽系のような環境はこの宇宙にどれくらいあるのだろうか？」これは、古くから人類が持ち続けてきた疑問であり、私たちが宇宙に対して夢を抱く理由でもある。この謎に挑むには、構造形成に着目した研究だけでなく物質進化にも着目することが必要不可欠である。筆者らは、国内外の大型電波望遠鏡を駆使した太陽型原始星天体の観測により、これまで知られていた化学組成とは全く異なる組成をもつ原始星天体を発見した。この発見は、これまで一つと考えられてきた惑星系への物質進化の道筋が、実は多様性を持っていることを示しており、太陽系の物質的起源の理解にも関わる大きな問題を提起した。本稿では、その発見の意味と波及効果について概説する。

1. はじめに

私たちが住む地球、この豊かな惑星は46億年前に太陽系の一員として太陽とともに生まれ、その後の悠久たる時間の中で、多様な命を育むに至った。「太陽系はどのような環境の下で生まれたのか?」「それは宇宙の中でどれほどユニークであるのか?」これらの問いは、宇宙における私たち自身の起源をたどり、存在意義を問ううえで極めて重要な問題であり、現代天文学における主要テーマとして活発に研究が展開されている。

恒星は星間ガス(星間分子雲)が100万年程度の時間をかけて重力収縮して形成される。生まれただばかりの星(原始星)の周りには原始星円盤が形成され動的降着源となる。原始星からT-Tauri型星への進化とともに、その一部が原始惑星系円

盤となり、そこで惑星系が形成されると考えられている。したがって、太陽系近傍にある多数の星・惑星系形成現場を調べることで、かつての太陽系の形成を推し量ることができる。星形成の研究は、電波、赤外線観測技術の進歩に伴い1980年代から大きく進展してきた。その結果、構造形成過程のみならず、そこでの物質進化についても研究が急速に進みつつある。特に、星間雲から原始星誕生に至る物質進化はかなり確立してきたと言ってよい。その先は、2011年から部分運用が開始された巨大電波望遠鏡ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)^{*1}が大きな威力を発揮するであろう。本稿では、太陽質量程度の原始星が生まれている領域の化学的進化がどこまでわかってきたのかを概観し、その後、筆者らが発見した「暖かい炭素鎖化学」、およびその

^{*1} ALMA: 口径12 mアンテナ54台と口径7 mアンテナ12台からなる電波干渉計。ミリ波からサブミリ波に至る波長領域で、開口合成の手法により高品質の電波画像を描く。空間分解能は最大0.01秒角でハッブル宇宙望遠鏡よりも1桁高い。感度も現存のミリ波サブミリ波望遠鏡を1桁以上凌駕する。これは、観測時間にして100倍以上の効果がある。北米、欧州、東アジアの三極の共同で、チリのアタカマ砂漠の高地(標高5,000 m)のサイトで建設が進んでおり、2011年には初期運用が開始され、2014年には本格運用が始まる。

波及効果・将来への展望について述べる。

2. 星なしコアにおける化学進化

星間分子雲の主成分は水素分子であるが、さまざまな分子がごく微量に含まれている（星間分子）。これまでに160種を超える星間分子が、主に電波望遠鏡による回転スペクトル線の観測によって検出されてきた。なかでも有機分子は検出された分子種の3/4を占める。星間分子雲は温度が10 K、水素分子密度がおよそ 10^4 – 10^6 cm⁻³と低温・低密度の環境にある。そのような極限環境下では、分子と分子が衝突して別の分子ができるという、最も単純な化学反応が起きる。例えば、宇宙線によるイオン化で水素分子から生成されたイオンH₂⁺は、周囲の水素分子と反応してH₃⁺を作る。H₃⁺は別の分子Xと衝突してXにプロトンを渡し、生成したXH⁺は別な分子Yと反応してXY⁺を生成する。このような反応の積み重ねで、10万年から100万年の時をかけてさまざまな分子が作られていく（イオン分子反応¹⁾）。

一方で、分子雲が重力収縮して星が生まれるタイムスケールも同程度なので、分子雲の化学組成は時間の関数として考えなければならない。分子雲が形成される直前の希薄な星間雲では、星間紫外線がよく透過するので、分子はできてはすぐに壊されてしまう。したがって、水素分子密度がある程度高くなって紫外線が遮断されたときが化学進化のスタートと言える。このことに着目して、Suzukiら²⁾は、化学モデルを用いて星間分子雲の高密度コア（水素分子密度が 10^4 cm⁻³程度）の時間発展を計算した。その結果、有機分子、なかでも炭素鎖分子と呼ばれる、炭素が直線状に連なった極端に不飽和な分子（C_nHやHC_nNなど）が、若い「年齢」の段階で豊富になることを指摘した。炭素は希薄な星間雲では主に炭素イオンまたは炭素原子として存在するが、密度が上がって星間分子雲が形成されると、そのコアでは酸素を含む分子と反応して安定な一酸化炭素（CO）分

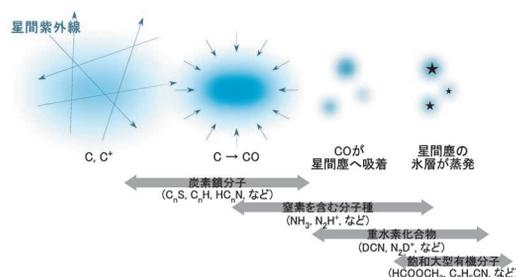


図1 分子雲の化学進化模式図。筆者らが発見した化学現象WCCCは含まれていない。

子へ徐々に変換されていく。しかし、その初期の過程では、まだ炭素原子が多く残っている。このため、若い分子雲コアでは炭素原子を材料として炭素鎖分子が効率よく形成される。しかし、分子雲の進化が進んで炭素原子がCOに固定されてしまうと当然少なくなってしまう。一方で、NH₃やN₂H⁺などの窒素を含む分子は、窒素原子の関与する反応の反応速度が遅いことなどもあり、進化の進んだ分子雲コアや、星形成の起こっている分子雲コアで豊富に存在する。このようなメカニズムで化学組成の系統的な違いが生じる（図1）。このことを利用すると、化学組成から分子雲の老若の目安をつけることができる。原始星が生まれる前の分子雲コア（星なしコア）では、等温収縮を起こしているために温度がほとんど変わらない。また、水素分子密度の測定は通常大きな誤差を伴う。そのため、進化段階のよい物理指標が存在しなかった。しかし、化学組成がその有効な手段となり、星形成研究の進展に大きく貢献した。

星間分子雲には、ガスとともに星間塵も存在している。そのため、温度が低いまま密度が上がってくると、分子の星間塵への吸着が起こる。水素分子、ヘリウム原子は吸着されないが、それらに次いで最も存在量の多いCO分子は吸着されるので、分子雲の化学組成に大きな影響を及ぼす。最も顕著な効果は、分子への重水素濃縮の進行である。分子雲中での反応の中心的役割を担うH₃⁺は、HDと反応することでH₂D⁺となるが、この

逆反応は吸熱反応のため低温の分子雲では起こらない。その結果、 H_2D^+ が濃縮され、その濃縮が他の分子に伝わり、さまざまな分子の重水素濃縮度が高まる。一方、 H_3^+ や H_2D^+ の破壊は、主にCOへのプロトン移動反応によって起こるため、COが星間塵に吸着されて減少するとそれらの寿命が延びる。この結果、重水素濃縮度がいっそう高まる。実際、進化の進んだ「星なしコア」の中心部で重水素濃縮度が非常に高いことが示されている³⁾。この重水素濃縮度も、「星なしコア」の進化段階を示す指標として広く用いられている。

3. 原始星誕生後の化学進化

3.1 大型飽和有機分子の発見

2節で示したように、原始星誕生前の化学組成の進化については、おおよその統一的描像が得られつつある。一方で、原始星誕生以後の化学進化の研究は、まだ端緒についたばかりと言ってよい。原始星誕生に伴う温度上昇が鍵となるが、そのような領域は太陽質量程度の原始星の場合、一般に1,000 AU程度と小さく、高感度・高空間分解能観測が要求されるからである。

10年ほど前、太陽質量程度のClass 0^{*2}原始星IRAS 16293-2422近傍で、 HCOOCH_3 などの大型飽和有機分子が電波観測によって検出され話題となった⁴⁾。星間塵上では、気相とは異なり、水素原子の付加反応が可能となる。その結果、星間塵に吸着したCOなどを原料として、 CH_3OH などさまざまな飽和有機分子が生成される。同時に、 HCOOCH_3 などの大型飽和有機分子も、同様に星間塵表面反応で形成され、星形成による温

度上昇に伴って星間塵表面から蒸発してきたものと見られる(ホットコリノ(Hot Corino)化学)。大型有機分子が原始星近傍の数百AUの領域に集中して検出されたことは⁵⁾、それらがいずれは惑星系にもたらされる可能性を意味しており、原始惑星系円盤への物質進化の点で非常に重要である。

そこで、筆者らは、別の非常に若いClass 0原始星(NGC 1333 IRAS 4B)でも観測を行ったところ、大型有機分子 HCOOCH_3 の検出に成功した⁶⁾。大型有機分子がより“一般的”に低質量星形成領域に存在することが明らかになっただけでなく、原始星進化のごく初期段階ですでに生成されていることを示した点でも大きな意義があった。これらの結果から、「星なしコア」から原始星円盤が形成されるまでの過程の化学的な道筋が十分に把握されたかに思われた。

3.2 別の化学組成を示す天体の発見

しかし、大型有機分子探査をさまざまな天体へ展開する過程で、意外な発見があった。野辺山45 m電波望遠鏡を用いて、おうし座のClass 0原始星L1527の高感度探査を行ったところ、 HCOOCH_3 などの大型有機分子のスペクトル線は全く検出されない一方で、炭素鎖分子 C_4H_2 の高励起輝線が強く検出されたのである。上述したように、炭素鎖分子は星形成が始まる前の若いコアで豊富に存在し、星形成領域では少なくなる。事実、 C_4H_2 は他の星形成領域で検出されたことはなかったため、これはたいへんな驚きであった。直ちに国内外の大型電波望遠鏡による追観測を行った結果、L1527では、 C_4H_2 以外にも C_2H 、 C_4H 、 C_6H 、 HC_5N 、 HC_7N 、 HC_9N などの多種多様な炭素鎖分子が、原始星に

^{*2} 低質量原始星に関するClass 0, I, II, IIIの分類: 遠赤外線から近赤外線に至る連続波スペクトルで低質量原始星を分類したもの。原始星の物理進化はこの順で進む。Class 0は形成したばかりの原始星で、分子雲コアに深く埋もれているため近赤外線でも見えないものが分類される。Class Iはそれよりも進化が進んだ原始星で質量降着が激しく起こっている段階である。Class II, Class IIIはともにT-Tauri型星と呼ばれる前期主系列星の段階にあたる。この段階では母体となった分子雲コアはほぼ散逸している。Class IIは古典的T-Tauri型星に対応し、惑星系の母体となる原始惑星系円盤が形成されている。Class IIIはそれよりも進化が進んだ弱輝線T-Tauri型星に対応し、原始惑星系円盤の内側がすでに散逸した段階とみてよい。

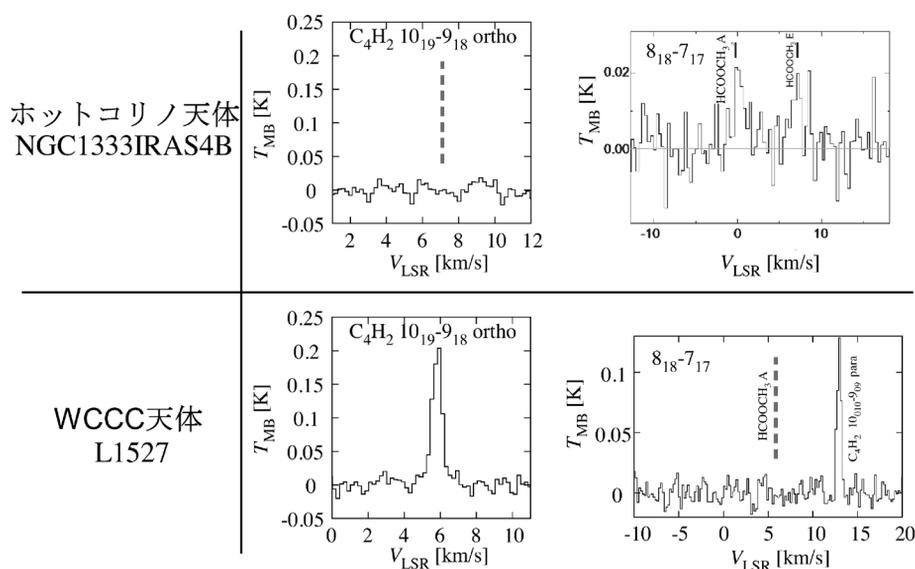


図2 NGC 1333 IRAS 4BとL1527における炭素鎖分子 C_4H_2 および $HCOOCH_3$ のスペクトル. 相反する傾向を示している.

落下しつつある高密度で暖かいガスに豊富に存在していることが明らかになった⁷⁾(図2).

4. 炭素鎖分子の再生成機構の提案

L1527領域は、明らかにこれまで知られていた星形成領域の化学組成と異なっている. このことから、原始星の進化段階が同じでも周囲の化学組成は同じとは限らないことがわかった. 炭素鎖分子が豊富という、化学的に若いことを意味する結果が得られたため、母体となる分子雲が、何らかの理由で他の天体に比べて速く収縮したのではないかと考えた.

通常、母体となる分子雲の形成から原始星が誕生する時間は、炭素鎖分子の存在できる期間(数10万年)よりも長い. このため、形成された原始星の周りに炭素鎖分子はほとんど残らない. しかし、それよりも速く収縮をしていた場合には、原始星が誕生しているにもかかわらず炭素鎖分子が存在できる可能性がある. L1527の近傍には炭素鎖分子が豊富な若い「星なしコア」TMC-1が存在する一方で、IRAS 16293–2422などの近傍

にはそのような「星なしコア」は存在しないことから、この考えは有力に思えた.

しかし、L1527では、「星なしコア」の代表でもあるTMC-1に比べ、長い炭素鎖分子の存在量が著しく少なく、窒素や硫黄など重たい原子を含む炭素鎖分子も相対的に少なかった. このことは、ただ単に生き延びているだけでは説明できず、原始星周辺で炭素鎖分子が再生成している可能性を示唆する. そこで、筆者らは次のようなメカニズムを提案した. 星間塵の氷層には CH_4 が豊富に含まれている. CH_4 の蒸発温度は25 Kなので低温の分子雲(10 K)では蒸発してこないが、星形成周辺の暖かい領域では一挙に蒸発する. これにより一時的に気相に炭素が豊富な状態が作られ、炭素鎖分子が効率的に再生成されるというものである. これは、「星なしコア」初期段階での炭素原子から始まる炭素鎖分子の生成機構とは異なり、温かい領域で CH_4 の蒸発をトリガーとして起こる新しい炭素鎖分子の化学である. そこで、これをWarm Carbon-Chain Chemistry(WCCC)と名づけた⁷⁾. この提案を受け、

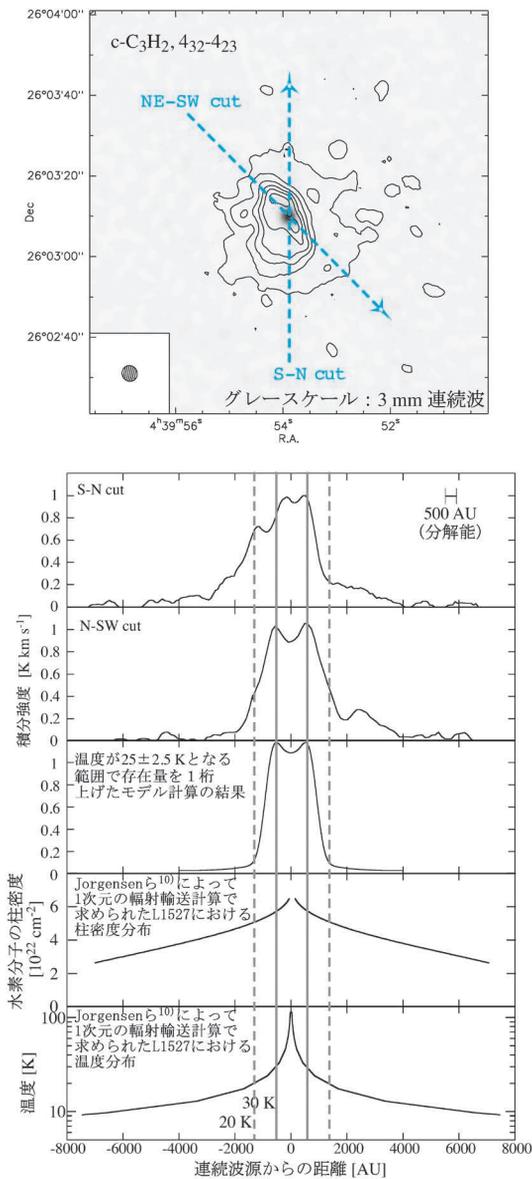


図3 L1527における $c\text{-C}_3\text{H}_2$ の分布 (上) と積分強度断面図 (下)。 25.0 ± 2.5 K になる大きさの領域で $c\text{-C}_3\text{H}_2$ の水素分子に対する存在量比を1桁上げたモデルと観測された積分強度断面図はよく一致している。下の二つのパネルはL1527における水素分子の柱密度分布と温度分布の1次元モデルをプロットしたものである。密度分布と比較しても著しい存在量増加が見てとれる⁹⁾。

WCCCは化学モデル計算でも確かめられた⁸⁾。

筆者らはさらに、Plateau de Bure ミリ波干渉計を用いてL1527における炭素鎖分子の高分解能観測を行った⁹⁾ (図3), その結果, 炭素鎖分子の水素分子に対する存在量比は, 原始星の半径1,000 AU程度の領域でその外側より1桁以上高くなっていることがわかった。これは, ちょうど CH_4 が蒸発する温度 (25 K以上) の領域に対応しており, WCCCの考えを強く支持する。また, L1527以外にもWCCC現象を起こしている天体IRAS 15398–3359 (おおかみ座) が発見され, この現象がL1527特有のものではなく, より一般的に起こりうる現象であることが示された¹⁰⁾。

5. 化学分野への波及効果

WCCCの発見は, 新しい星間化学現象として発展しつつある。例えば, 星なしコアに比べて高温・高密度な領域に炭素鎖分子が豊富に存在することから, 負イオンの研究に大きなインパクトを与えた。負イオンは, C_6H^- が2006年に初めて「星なしコア」TMC-1で同定された¹¹⁾。しかし, C_6H のような炭素鎖分子はどこにでもあるわけではなく, さまざまな物理状態で負イオンの振る舞いを調べることは難しかった。L1527やIRAS 15398–3359のように高密度領域に炭素鎖分子を豊富に含んでいる天体で実際に負イオンが検出されたことにより, 密度依存性など負イオン化学の理解が大きく促進した^{e.g. 12)}。また, L1527では, 気相中の CO_2 をトレースする HCO_2^- も星形成領域として初めて検出した¹³⁾。この発見は, 解明が困難だった低質量星形成領域における CO_2 の生成過程に重要な情報を与えた。

6. 天文学・天体物理学への波及効果

星形成領域の化学組成を見た場合, 二つの極端なケース, ホットコリノ化学を示す天体とWCCC天体があることがわかった。これは図2に示すスペクトルからも明らかである。その違い

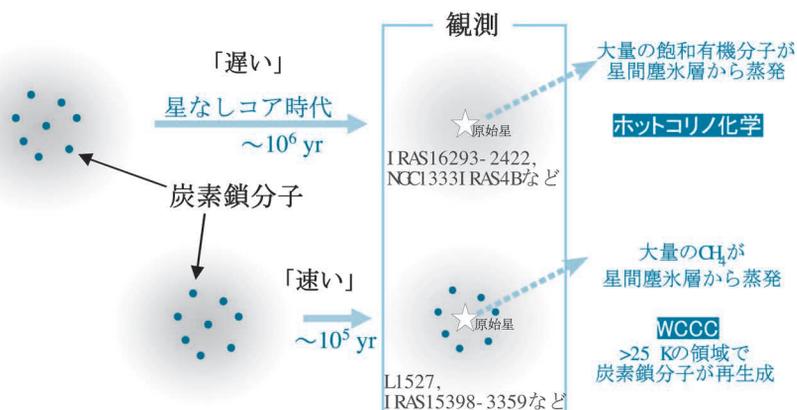


図4 化学的多様性の起源. WCCC 天体では、再生成された炭素鎖分子のほかに、星なしコア時代の炭素鎖分子も周囲に取り残されている (10000 AU スケール).

は、星形成に至る物理過程の違いを反映していると考えられる。当初考えたように、もし、分子雲が形成されてから原始星が誕生するまでの時間が短ければ、原始星の周囲に炭素鎖分子が多く取り残される (図4)。しかし、実はそれだけでなく、炭素が炭素原子のまま星間塵に吸着されることになるため、順次水素化されて CH_4 が星間塵上で豊富に生成される。原始星が形成され周囲が温められると、この CH_4 が蒸発するため、WCCC が起こって炭素鎖分子が効率よく生成される。一方、もし、「星なしコア」時代の時間が十分長ければ、炭素は主に気相反応で CO になってから星間塵に吸着されるため、 CH_3OH や大型飽和有機分子が生成される。このように考えると、WCCC とホットコアノ化学は相反することになり、上記の観測事実とよく合致する。「星なしコア」時代の長さの違いが星間塵表層の組成の違いとして記憶され、その後の原始星円盤の化学組成の違いを生んでいるというわけである。事実、赤外線での星間塵表層の氷の観測では、WCCC 天体 IRAS 15398–3359 における CH_4 の吸収が他の天体よりも格段に大きい¹⁴⁾。

「星なしコア」時代の長さの違いによって原始星円盤の化学組成が変わるという考え方は、L1527 におけるさまざまな分子の重水素濃縮度が

らも支持される。ホットコアノ天体では分子における重水素濃縮度が数十%と非常に高くなる現象が報告されている。一方、L1527 では、重水素濃縮度は 2–7% に止まり、ホットコアノ天体に比べて有意に低いことが明らかになった¹⁵⁾。前述したように、分子における重水素の濃縮は、「星なしコア」時代に CO が星間塵に吸着することで顕著に進む。「星なしコア」時代が短いことの影響が効きにくく、低い重水素濃縮度を示す。さらに、重水素濃縮が H_2D^+ から他の分子へ移動するのにも 10^5 年以上かかるので、この点でも不利である。このように、低い重水素濃縮度は、上記の筆者の考えを支持する。

WCCC は星間塵から蒸発してきた CH_4 が C^+ と反応することで起こる。したがって、もし CH_4 の量が他の OH などのさまざまな分子に比べて少なければ、 C^+ の主な反応相手は CH_4 ではなくてしまい、WCCC 現象は起こらない。水素分子に対する存在量比として 10^{-7} 程度以上の CH_4 の存在量が必要とされる。そこで、L1527 において気相中の CH_4 存在量を調べるために、 CH_3D の高感度観測も行った。その結果、赤外領域の振動回転スペクトル線による大質量星での検出を除いて、星間分子雲で初めて気相中のメタンを捉えることができた¹⁶⁾。L1527 での他の炭素鎖分子の重

水素濃縮度 (2-7%) から CH_4 の存在量比を見積もると、 $(4.3-15.2) \times 10^{-6}$ であり、WCCC現象が起こるために十分な量であることがわかった。

また、筆者らの観測により、L1527だけでなく、第2のWCCC天体である IRAS 15398-3359 の近くにも化学的に若い「星なしコア」Lupus1A が存在していることが明らかになった。その化学組成はL1527近傍のTMC-1と酷似している¹⁷⁾。このように、炭素鎖分子が豊富な若い「星なしコア」がWCCC天体のごく近傍にあることは、それらの領域そのものが若いことを示唆し、上記の議論を支持する。

このような分子雲コア形成から星形成に至るまでの時間の違いは、最近、星形成の研究においても「星なしコア」の割合の領域ごとの違いという統計的な形で浮かび上がってきている。しかし、個々の天体の速い遅いを直接的にサポートする「物理的」観測事実はこれまで報告されていない。これは、物理状態の観測が、“現在の”状態を調べることであって、“過去の”履歴を知りえないためとも言える。したがって、統計的な手法により領域全体の平均の寿命を出すことが現在のところ精一杯なのである。これに対して、化学組成は過去の物理状態の履歴を鋭敏に反映する。特に、複雑な分子であればあるほどその効果は大きく、違いが明瞭に出る。このように、化学の眼は星形成現象を新しい角度から捉えることができる。今後このような手法が広く用いられ、星形成過程の理解がいつそう促進されることを期待したい。

7. 原始星円盤から原始惑星系円盤へ

Class 0天体における化学的多様性の起源は、そのものが星形成過程の多様性を意味しており、重要な研究対象である。しかし、さらに興味もたれるのはその後の進化である。低質量星形成領域では、将来100 AUから数百AU程度の原始惑星系円盤が形成される。したがって、WCCCとホットコリノ化学のような二極的な物質進化の分

岐は、それが惑星系まで保持されるとすれば、われわれの住む太陽系の環境がどちらの（あるいはどちらに近い）過程を経て作られたのかという新しい問題を提起することになる。

しかしながら、この多様性がそのまま原始惑星系円盤へ受け継がれるのか否かについては、WCCC天体とホットコリノ天体それぞれの進化形と考えられる天体を探し、その化学組成と分布をつぶさに調べ上げていかねばならない。これには、非常に高い空間分解能と感度が要求され、既存の望遠鏡ではほぼ不可能であった。しかし、ALMAが稼働し始めた今、このような研究の展開が現実のものとなりつつある。

太陽系がどのような環境で生まれたのか。その環境はどれだけ普遍的、もしくは奇跡的なものであったのか。この究極の疑問に答えるためにも、本格的なALMA時代の到来が待ち遠しい。

謝辞

研究奨励賞受賞および本稿執筆にあたり、多大なご支援をいただいた山本 智教授（東京大学大学院理学系研究科）に、深く感謝したい。本研究は、国内外のさまざまな望遠鏡における共同利用観測に基づいて行われており、このような成果につながったのも、観測装置を開発し、運用して下さっている方々あってのことだと思う。特に、国立天文台の野辺山45 m望遠鏡やASTE 10 m望遠鏡での観測においては、野心的な観測に挑戦させていただけたことで、このような成果が出せたと感じている。

本稿の科学的な内容は、筆者の論文 [文献6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 17] に基づいている。紙面の都合上、簡略化して説明しているところも少なくない。詳しくはそれらの論文を参照されたい。また2013年に投稿したレビュー論文¹⁸⁾にもまどめられているので、それも参考にいただければ幸いである。

参考文献

- 1) Klemperer W., 1970, *Nature* 227, 1230
- 2) Suzuki H., et al., 1992, *ApJ* 392, 551
- 3) Caselli P., et al., 1999, *ApJ* 523, L165
- 4) Cazaux S., et al., 2003, *ApJ* 593, L51
- 5) Bottinelli S., et al., 2004, *ApJ* 617, L69
- 6) Sakai N., et al., 2006, *PASJ* 58, L15
- 7) Sakai N., et al., 2008, *ApJ* 672, 371
- 8) Aikawa Y., et al., 2008, *ApJ* 674, 984
- 9) Sakai N., et al., 2010, *ApJ* 722, 1633
- 10) Sakai N., et al., 2009, *ApJ* 697, 769
- 11) McCarthy M. C., et al., 2006, *ApJ* 652, L141
- 12) Sakai N., et al., 2007, *ApJ* 667, L65
- 13) Sakai N., et al., 2008, *ApJ* 675, L89
- 14) Oberg K. I., et al., 2008, *ApJ* 678, 1032
- 15) Sakai N., et al., 2009, *ApJ* 702, 1025
- 16) Sakai N., et al., 2012, *ApJ* 758, L4
- 17) Sakai N., et al., 2010, *ApJ* 718, L49
- 18) Sakai N., Yamamoto S., 2013, *Chem. Rev.*, in press

Discovery of Warm Carbon Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Regions and Its Astrophysical/Chemical Impact

Nami SAKAI

*Department of Physics, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: How many planetary systems harboring life like the Solar system in the Universe? This is a fundamental question which our humankind has long asked for. To address this question scientifically, we need to investigate material evolution as well as structure formation and evolution, associated with star and planet formation. With this in mind, we have explored chemical compositions of solar-type protostars by radioastronomical observations, and discovered a new class of the protostars with rich carbon-chain molecules. This result clearly indicates that material evolution to planetary systems is not a single pathway, but has significant diversity. In this article, I present astrophysical and astrochemical significances of this discovery with some future prospects.