

論文内容の要旨

論文題目： Discovery of Warm Carbon Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Regions and Its Astrophysical Implication

(低質量星形成領域における「暖かい炭素鎖化学」の発見とその宇宙物理学的意義)

氏名： 坂井 南美

1. 背景

現在、太陽質量程度の恒星の形成過程の中で重要な課題の一つは、原始星円盤から原始惑星系円盤への物理進化の理解である。星間分子雲コアの重力収縮により原始星が誕生する際、原始星のまわりには 1000 AU スケールのガス円盤が形成され動的降着源となる。この原始星円盤は原始星の進化とともに原始惑星系円盤に進化すると考えられている。従って、星形成から惑星系形成に至る物理進化とその多様性を探求する目的で、原始星円盤の観測的研究が非常に注目されている。

一方、原始星円盤から原始惑星系円盤への化学進化は、惑星環境の多様性や生命の起源などとも関連する重要なテーマであり、活発な研究が進められている。近年、太陽質量程度の原始星において、 HCOOCH_3 などの大型有機分子が電波観測によって検出され話題となった。これらの分子は星形成に伴う温度上昇のために星間塵表面から蒸発してきたものと考えられる (Hot Corino Chemistry)。これらの分子が原始星円盤で検出されたことは、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も非常に重要である。そこで、申請者は、星形成過程のどの段階で大型有機分子が生成されるのかを調べる目的で、非常に若い小質量原始星 NGC1333IRAS4B の観測を行い、それらがごく初期段階から存在していることをつき止めた。一方で、大(中)質量星形成領域である NGC2264IRS1 領域の観測から、進化が進むとこのような分子は減る傾向にあることがわかった。大型有機分子の検出は、星間塵氷層の蒸発によって生じる化学組成の一時変化を捉えたものであり、その観測によって星形成の初期段階を選び出すことができる可能性を示した。これらの研究の結果、原始星円盤の化学組成の一般的特徴が十分に把握されたかに思われた。

しかし、大型有機分子探査を他の様々な領域の小質量星形成領域へ展開する過程で、意外な発見があった。おうし座の L1527 原始星で高感度探査を行ったところ、大型有機分子は全く検出されず、炭素鎖分子 C_4H_2 の高励起輝線が強く検出された(図 1)。これは大変な驚きで、同じような進化段階の天体でもその化学組成に大きな違いがある可能性が出てきた。本論文の目的は、この発見を確実にした上で、その起源および宇宙物理学的意義を探ることである。

2. 星形成領域における新しい炭素鎖分子生成メカニズムの発見

炭素鎖分子は、一般に星形成以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と考えられてきた。事実、 C_4H_2 はこれまで星形成領域で検出されたことがない。そこで、直ちに内外の大型ミリ波望遠鏡による観測を行った結果、L1527 には 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豊富に存在していることがわかった。しかも、 C_4H の輝線の線幅の空間的变化から、原始星に落下しつつある高密度で暖かいガスに存在していることが示された。このことから、L1527 は星形成領域にも関わらず炭素鎖分子に恵ま

れた特異な化学的環境にあることがわかった。星形成領域で一般に炭素鎖分子が少ない理由は、星形成に至る時間スケール(10^6 yr 程度)の間に化学反応によって壊されたり星間塵に吸着されてしまうからである。これをもとに考えると、L1527 では重力収縮が自由落下に近く、他の原始星の場合よりも早かったために、炭素鎖分子がある程度生き延びている可能性が考えられる。

しかし、L1527 の炭素鎖分子の組成は若い分子雲コアの代表である TMC-1 と系統的に異なっていた(図 2)。また、短い炭素鎖分子 C_2H の存在量は L1527 で極端に多い。このことは単に生き延びていると考え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ことを示している。そこで、再生成のメカニズムとして、次のようなスキームを提案した。星間塵の水層には CH_4 が含まれている。 CH_4 の昇華温度は 30 K なので低温の分子雲(10 K)では気相に出てこないが、星形成周辺の暖かい領域で一挙に蒸発する。この CH_4 の蒸発により炭素が豊富な状態が作られ、主に気相反応によって様々な炭素鎖分子が爆発的に再生成されるというものである。これを Warm Carbon-Chain Chemistry(WCCC)と名付けた。この提案を受け、WCCC は化学モデルシミュレーション計算でも確かめられた (Aikawa et al. 2008; Hessel et al. 2008)。シミュレーションによって得られた存在量や空間分布は L1527 における観測結果と対応し、この天体で WCCC が起こっていることを支持している。一方で、L1527 では高感度観測にもかかわらず $HCOOCH_3$ などの大型有機分子は検出されなかった。従って、L1527 の化学組成は IRAS16293-2422 などの「典型的」原始星と明らかに異なっている。WCCC の発見は、星形成領域の化学組成が均一でないことを明瞭に示した。

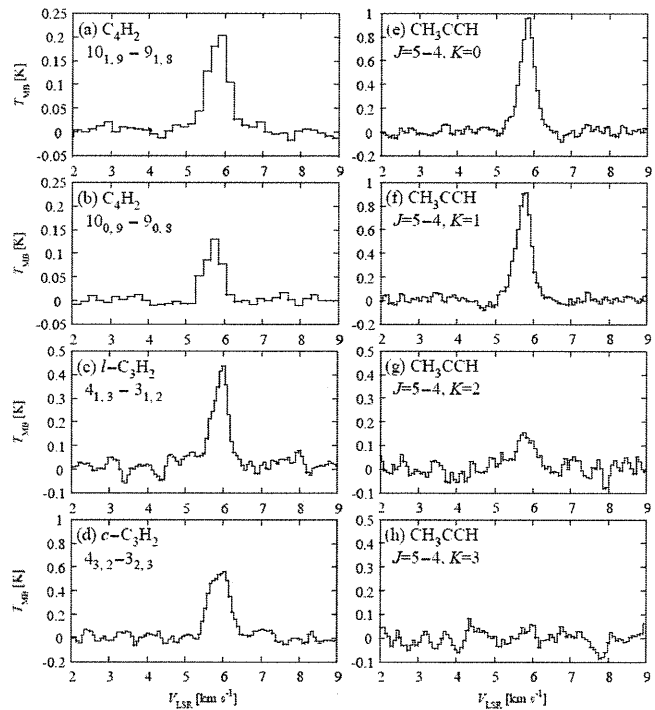


図 1. L1527 における炭素鎖分子のスペクトル線

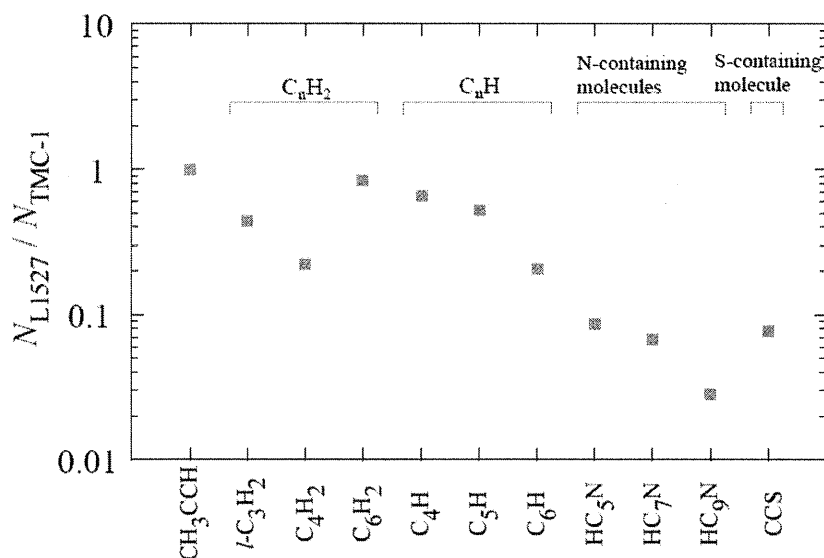


図 2. L1527 の TMC-1 に対する様々な炭素鎖分子の柱密度比

3. WCCC の展開

さらに、L1527 において負イオン分子 C_6H を検出した。 C_6H が検出されたのは星間分子雲では TMC-1 に次いで 2 天体目であり、星形成領域では初めてである。 $[C_6H]/[C_6H]$ 比は 9.8 % と高く、TMC-1 の 4 倍程度もあることを見出した。さらに、第二の負イオン分子 C_4H も検出した。この分子は TMC-1 ですら検出されておらず、星間分子雲で初めての検出である。これらの成果は WCCC における負イオンの役割の重要性を示すものとして注目された。また、L1527 は新しい分子の探査においても有用な天体であることがわかった。

また、最近、気相中の CO_2 をトレースする重要なイオン HCO_2^+ を L1527 で検出した。 HCO_2^+ は銀河系中心部で顕著に見られるイオンで、星形成領域では初めての検出である。 CO_2 は基本的な星間分子でありながら、その挙動はよくわかっていなかった。もし、 CO_2 が主に星間塵上で生成し、星形成に伴って蒸発しているとすると、昇華温度から判断して原始星のごく近傍にのみ存在することになる。観測された HCO_2^+ の強度を解析した結果、その場合には CO_2 の存在量が炭素の元素存在量を超えるという不合理が生じることがわかった。従って、星形成領域において、 CO_2 は蒸発領域よりもずっと広がって存在しており、気相反応によって生成していると見られる。その可能性の一つは WCCC で生成される炭素鎖分子の酸化反応である。Aikawa らのモデルでも WCCC による HCO_2^+ の増加が予想されており、これを支持する。

5. 第二の WCCC 天体の発見

WCCC は L1527 でのみ起こる特殊な現象なのか？この問いに答えるために、16 個の星形成領域について、野辺山 45 m 望遠鏡とオーストラリアの Mopra 22 m 望遠鏡を用いて炭素鎖分子のサーベイ観測を行い、WCCC 天体の候補を探した。その結果、おおかみ座の IRAS15398-3359 が、L1527 と酷似した特徴を示すことを発見した。即ち、 C_4H などの炭素鎖分子輝線が非常に強く、 C_4H_2 や HC_3N の高励起輝線が検出され、さらにそれらの炭素鎖分子が原始星近傍に集中して分布していた。また、 HCO_2^+ 輝線も検出された。これらの事実から、間違いなく第二の WCCC 天体であると結論できる。この他にも、部分的に上記の特徴を満たす天体がいくつか存在することがわかった。L1527 や IRAS15398-3359 は極端な WCCC 天体であるが、WCCC 現象自体は程度の差はあれ、星形成領域における一般現象であると考えられる。また、大型有機分子が検出される星形成領域 (Hot Corino 天体) では一般に WCCC 現象は弱い傾向にあることも示された。

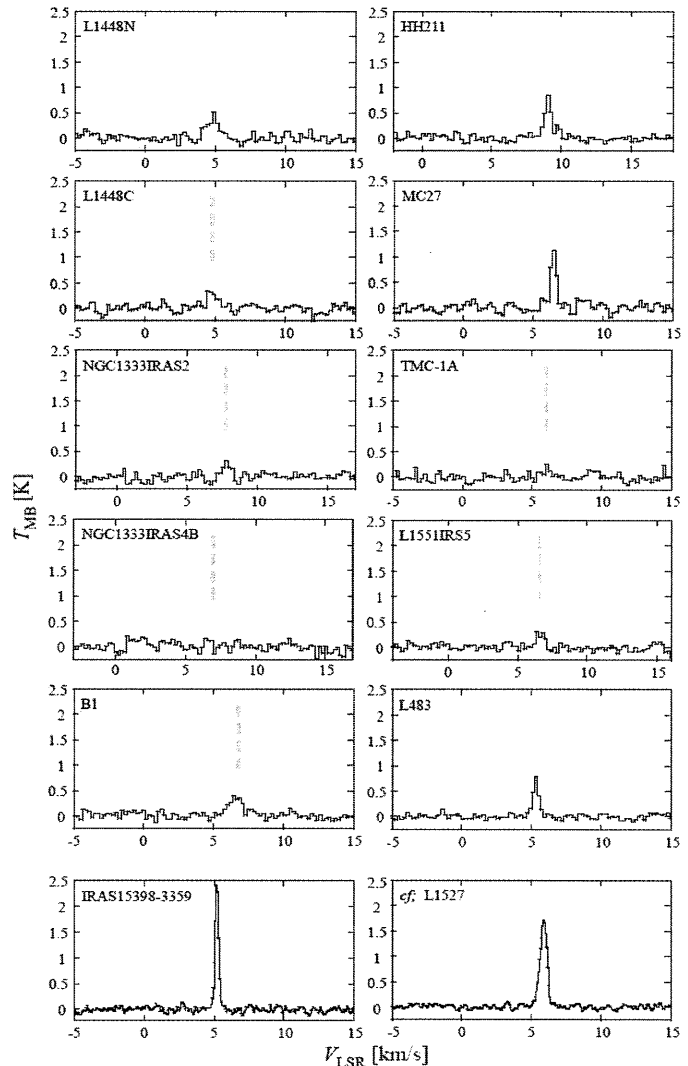


図 3. 様々な小質量星形成領域における C_4H 輝線

5. WCCC の宇宙物理学的意義

上記の研究から、星形成領域の化学組成を特徴付ける2つの極端なケースがあることがわかってきた。一つは WCCC 天体であり、もう一つは Hot Corino 天体である。これらの違いは、星形成に至る物理過程の違いを反映している可能性が高い。もし、重力収縮が自由落下に近ければ、炭素は原子のまま星間塵に吸着され、順次水素化されて CH_4 となる。そのため、星間塵上の CH_4 が相対的に豊富になると考えられる。一方、もし、ゆっくりと収縮した場合、炭素は CO に変化してから星間塵に吸着され、水素化されて CH_3OH や複雑な有機分子となる(図3)。もしそうだとすると、WCCC と Hot Corino 化学は相反していることになる。この場合、L1527 や IRAS15398-3359 では収縮が比較的早かったことを意味し、Hot Corino 天体では収縮がゆっくりであったことを意味する。中間的天体の存在は、収縮速度の違いによって説明できる。

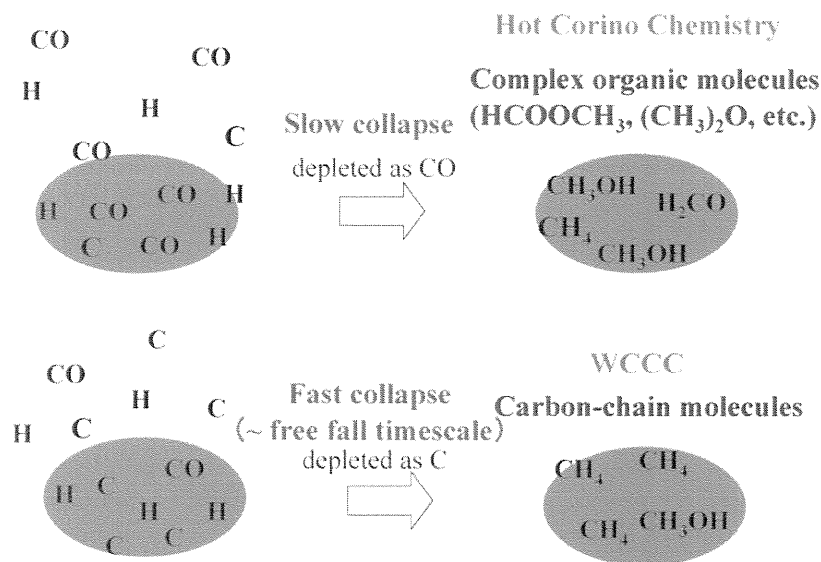


図3. 収縮速度で変わる星間塵の氷層の化学組成

これまでのところ、収縮速度の違いをサポートする他の強い観測事実は他にない。逆に言うと、化学組成が星形成現象の多様性の新しい側面を浮かび上がらせている可能性がある。化学組成は過去の履歴を非常に鋭敏に（非線形に）反映する。これまで、星形成から惑星系形成に至る過程は統一的に理解され、その間の化学進化についても天体による違いはないと信じられてきた。しかし、物理的に見ると同じような原始星でもその化学組成には多様性がある。その多様性は星形成過程の多様性を探る手段として、星形成研究において新しい方法論となろう。