

低質量原始星における化学組成の多様性

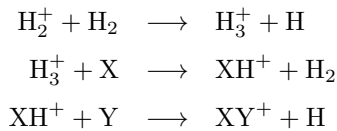
今井 宗明 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

ここ約 10 数年間の観測研究によって低質量原始星天体 (Class 0/I) の化学組成は天体ごとに異なっていることがわかってきた。その 1 つの典型は飽和有機分子 (CH_3OH , HCOOCH_3 , $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ など) に恵まれる Hot Corino 天体であり、もう 1 つの典型は不飽和な有機分子 (CCH , $c\text{-C}_3\text{H}_2$, HC_5N などの炭素鎖分子およびその関連分子) に恵まれる WCCC 天体である。ほぼ同じ進化段階にありながら化学組成がこれほどまでに異なる理由としては分子雲コア形成から星形成に至るまでのタイムスケールの違いが提案されている。本研究ではペルセウス座分子雲に存在する 32 個の Class 0/I 原始星天体について、 HN^{13}C および DNC のミリ波スペクトル線観測を行い、重水素濃縮度の観点から化学組成の違いの原因について考える。

1 Hot Corino & WCCC

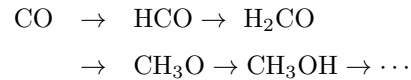
初期の進化段階にある希薄な分子雲では、宇宙線や星間紫外線により、気相中の化学反応で生成される分子はすぐに壊され、化学進化はあまり進まない。その後、分子雲の重力収縮により水素分子密度が 10^4 cm^{-3} 程度の分子雲コアが形成されると、紫外線が遮断され、分子形成が進行する。星間空間では、密度が極端に希薄なため、発熱反応によって生じるエネルギーを周りの分子の運動エネルギーとして逃がすことができない。その結果、反応による生成物が 1 つの場合、反応後のエネルギーによって逆反応が起こり、分子はすぐに壊れてしまう。そのため、気相中で付加反応は起こりにくい。一方で、分子雲では、宇宙線によって生成される H_2^+ を介して以下のようなイオン分子反応により化学反応が進行する。



このような反応の結果、炭素鎖分子が一時的に豊富に作られる。その後、炭素鎖分子は酸素を含む分子と反応し、安定な CO 分子となる。この過程で炭素鎖分子は徐々に少なくなる。

さらに分子雲の重力収縮が進み密度の高い分子雲コアが形成されると、CO の星間塵 (grain) への吸着が起こる。星間塵上では、反応によるエネルギーを

接している星間塵に逃がすことができるため、発熱を伴う付加反応も進行する。その結果、CO は以下のような H 原子の付加反応により、様々な飽和有機分子へと変化する。



その後、星間塵上で生成した飽和有機分子は、原始星の誕生に伴う温度上昇により蒸発し、気相空間に放たれる。このようにして、飽和有機分子に富む原始星エンベロープが形成される。実際に HCOOCH_3 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$ などが低質量原始星 IRAS16293-2422 などで見え、その分布が原始星周辺の数 100AU 程度の暖い領域に局在していたことから、Hot Corino 化学と呼ばれている (Cazaux et al. 2003; Bottinelli et al. 2004)。

これに対し、近年、原始星エンベロープに炭素鎖分子を多く含む L1527 のような天体が発見された (Sakai et al. 2008)。この天体の炭素鎖分子は、分子雲進化の途中で生成される炭素鎖分子の生き残りとは考えにくく、原始星の誕生後に再生成された可能性が考えられている。実際、L1527 の近傍にある、Class 0 の星なしコア TMC-1 と L1527 を比較してみると、生成にある程度時間のかかる長い炭素鎖分子や、窒素を含む炭素鎖分子の存在量が L1527 で顕著に少ないことが報告されている (Sakai et al. 2008)。そこで、L1527 における豊富な炭素鎖分子の存在を説明する

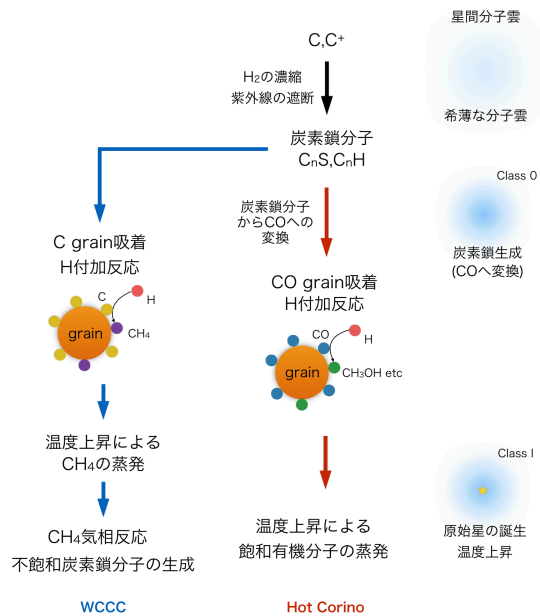
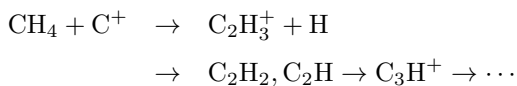


図 1: Hot Corino と WCCC の化学進化

ため、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) と呼ばれるプロセスが提案された (Sakai et al. 2008)。WCCC では、星間ガスの収縮が早い場合、炭素鎖分子が CO 分子に変換される前に星間塵への吸着が起こるために、星間塵上では、炭素鎖分子が水素化されて CH₄ が生成される。このようにしてできた CH₄ の分子は、Hot Corino の場合と同様に、原始星形成による温度上昇とともに蒸発し、気相に放たれる。この CH₄ 分子は、気相中で、次のようなイオン分子反応で炭素鎖分子を生成する。



その結果、WCCC では不飽和な有機分子 (炭素鎖分子) に富む天体が形成される。

Sakai らは、WCCC 現象を裏付ける証拠として、L1527 で原始星の形成で温度上昇した領域で炭素鎖分子 c-C₃H₂ が著しく増量していることを見出した。CH₄ が蒸発する温度は 25.0 ± 2.5 K なので、そのような暖い領域で炭素鎖分子の生成が効率よく起きていると考えられる。

2 Observations & Results

WCCC では、星間ガスの収縮の時間が早く、星なしコア段階の時間が短いと考えられている。分子への重水素の濃縮は時間とともに、また CO の星間塵への吸着とともに増加するので、星なしコアの進化を示す指標として知られている (e.g. Hirota et al. 2011)。従って、WCCC 天体は、Hot Corino 天体に比べて低い重水素濃縮度を示すことが予想される。

そこで、野辺山の 45 m 電波望遠鏡を用い、ペルセウス座分子雲の Class 0/I の低質量原始星の DNC (J=1-0) 輝線と HN¹³C (J=1-0) 輝線を 32 天体 (図 3) で観測した (図 2)。

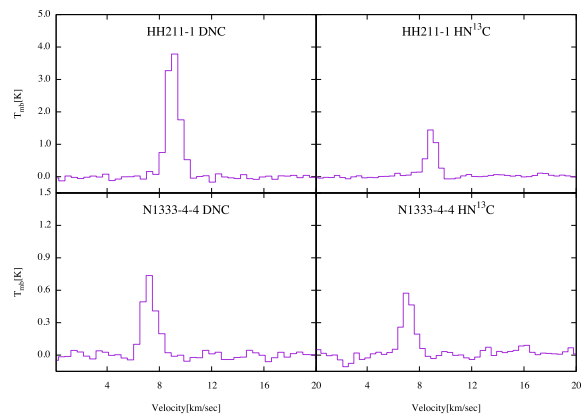


図 2: ペルセウス座分子雲の Class0/I の低質量原始星の DNC (J=1-0) と HN¹³C (J=1-0) のスペクトルの一例

観測した天体は、クラスター中心部 (緑) とクラスター外縁部などの星形成が疎な部分の天体 (紫) に付随しており、領域ごとに分類してある。各天体の CCH、CH₃OH の積分強度と領域を比較すると、星形成の疎な部分 (紫) では CH₃OH の存在量が低く、WCCC の傾向を示すことがわかった。

そこで、これらの天体について、DNC と HN¹³C の積分強度を比較することで、各天体の重水素濃縮の程度を見積もり、さらに、重水素濃縮度と各天体の位置にどのような相関があるかを調べた (図 4)。

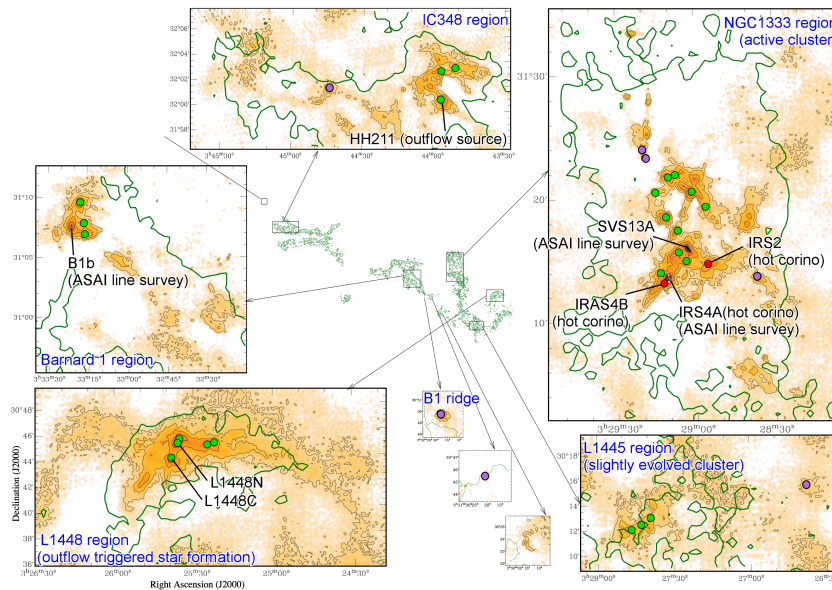


図 3: ペルセウス座分子雲のダストエミッションのマップ (Hatchell et al. 2009)。緑の枠は CO ガスの境界。赤は Hot Corino 天体、緑・紫はまだ区別されていない天体を表す。緑はクラスター中心領域、紫はクラスター外縁部及び孤立した領域の天体である。

ことがわかった。また、DNC の強度が低いほど濃縮度が低くなることも示された。

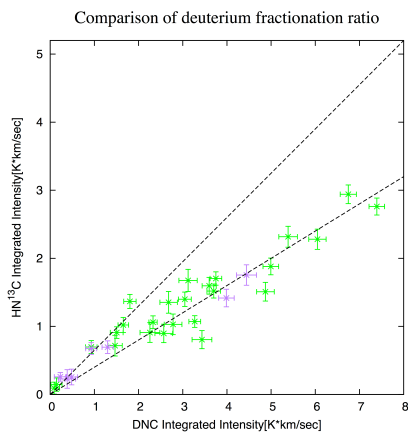
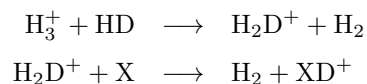


図 4: 各天体における重水素濃縮度の比較 (誤差 3σ)。

図 4 から、クラスター中心部に属する原始星天体では重水素濃縮度が高く、クラスター周囲などの星形成が疎な部分では重水素濃縮度が低い傾向がある

3 Discussion

重水素濃縮度は、分子雲コアが形成されてから以下のような反応によって時間とともに増加する (e.g. Watson 1974; Walmsley et al. 2004)。



第 1 章で述べたように、WCCC では Hot Corino に比べて短い時間で分子雲コアが収縮し、原始星が形成される。従って、WCCC では重水素濃縮度が小さくなるのが推測されているが (Sakai et al. 2009)、これは DNC の強度が低い天体で濃縮度が低くなっている今回の観測結果と矛盾しない。また、クラスター中心部で重水素濃縮度が高くなっているという結果は、周囲の原始星からのフィードバック効果に

より分子雲コアの収縮が遅くなっている可能性が考えられる。

WCCC と重水素濃縮度の関係を見るために、飽和有機分子 CH_3OH の存在量 (IRAM 30 m 望遠鏡により観測したデータ) と重水素濃縮度の関係をプロットした (図 5)。今まで述べてきたように WCCC では、

Comparison of deuterium fractionation ratio and saturated organic molecule

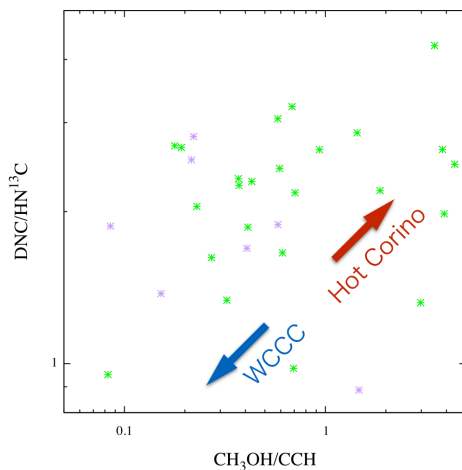


図 5: 飽和有機分子 (CH_3OH) と炭素鎖分子 (CCH) の積分強度比と重水素濃縮度 ($\text{DNC}/\text{HN}^{13}\text{C}$) の関係

不飽和の炭素鎖分子が飽和有機分子に対して多く、重水素濃縮度も低いと考えられるので、図 5 において左下に来ることが予想される。実際、星形成が疎な部分 (紫) は、Hot Corino の予想される右上のところには来ていないことがわかる。

図 4,5 において、緑で示されたクラスター中心部の原始星でも重水素濃縮度が低く、また、飽和炭素鎖分子が少ない天体が少なからず存在する。これは、クラスター中心部から離れた星形成が疎な部分で WCCC が起こりやすいということが一つの見かけ上の指標に過ぎず、WCCC と Hot Corino の違いが生じる理由に、何らかの別の環境効果が寄与している可能性を示唆する。

4 Conclusion

星形成における化学進化で今まで知られてきた Hot Corino 化学に対して、最近発見された WCCC という化学現象について焦点を当て、WCCC では系統的に重水素濃縮度が低くなる傾向があることを示した。このことは、星なしコア時代の長短によって原始星天体の化学組成が大きく異なるという考えと、大枠において矛盾しない。これらの結果は、原始星の進化過程について、今までの物理的な見方では見えてこなかった部分が、化学的なアプローチによって新たに見えるようになってきたという点で、有意義であると考えられる。

しかし、星形成に伴う化学進化にはわかっていない点が多く、例えば、そもそも形成過程に Hot Corino と WCCC 以外の化学進化は存在しないのか、Hot Corino と WCCC を経て形成されるその後の惑星系にはどのような違いがあるのか、さらには、我々の太陽系はどのような化学進化を経て今の惑星系になったのかなど、様々な興味深い疑問が生じる。今後、WCCC 現象での化学進化をさらに詳しく調べることで、これらの謎を紐解いていけると考える。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台、野辺山宇宙電波・太陽電波観測所からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Cazaux, S. et al. 2003, ApJ, 593, L51
- Bottinelli, S. et al. 2004, ApJ, 617, L69
- Sakai, N. et al. 2008, APJ, 672, 371
- 坂井 南美 2013, 天文月報 106 780
- Hirota, T. et al. 2011, ApJ, 736, 4
- Sakai, N. et al. 2010, APJ, 722, 1633
- Hatchell, J., & Dunham, M.M., 2009, A&A, 502, 139
- Watson, W.D. 1974, ApJ, 188, 35
- Walmsley, C.M. et al. 2004, A&A, 418, 1035
- Sakai, N. et al. 2009, ApJ, 702, 1025