

論文の内容の要旨

Evolution of Molecular Isotopic Ratios in the Low Mass Protostar L1527

(低質量原始星 L1527 における分子の同位体比の進化)

吉田 健人

背景と目的

我々の太陽系の物質がどのように形成されたかという問いは、現代科学の大きなテーマの一つである。惑星科学の分野では、彗星の分光測定や隕石の分析などによる先太陽系物質の探索を通して、太陽系の形成過程とそこでの物質進化が議論されている。一方で、いま生まれつつある恒星および惑星系やそれらの母体となる星間ガスの物理的・化学的進化をたどることにより、太陽系形成過程の理解を目指す研究も活発に行われている。太陽系の物質的起源の理解のためには、この二つのアプローチを結びつけ、惑星系形成の過去から現在に至る統一的な視点を獲得する必要がある。たとえば、惑星科学と星間化学の両者の研究を繋ぐ指標となる分子種を見出すことが必要であることがしばしば指摘されてきた。しかし、分子種だけでは、それが仮に星形成領域と隕石の両方で発見されたとしてもその関連性は必ずしも明確ではない。そこで注目されるのが、同位体の「異常」である。星形成領域で見られる同位体異常が隕石や彗星でも見つかれば、両者の関連性は遥かに強固なものとなる。このような視点から、本研究では、星間化学の側面から星形成領域における同位体比異常の進化に焦点を当てる。

分子における同位体比の異常を示す最も顕著な例は重水素である。宇宙における D/H 存在比は 10^{-5} 程度に過ぎないにもかかわらず、星の母体となる星間分子雲において、重水素化分子の通常分子に対する比は 10^{-2} – 10^{-1} と高い。このような重水素の分子への「濃縮」は低温 (~ 10 K) における化学過程の特徴であり、星間分子雲で広く見られる (図 1 左)。また、近年、分子に含まれる ^{13}C 同位体の割合にも大きな異常があることが明らかになってきた。その一つは、いくつかの炭素鎖分子の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比が元素の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比 (60–70; 太陽系近傍の値) より有意に大きいことである。例えば、星なしコア (まだ星形成を起していない分子雲) のひとつである TMC-1 では $\text{CCS}/^{13}\text{CCS} = 230 \pm 130$ と報告されている。すなわち、 ^{13}C は分子中で「希釈」されていることになる。

星形成領域における ^{13}C 同位体や重水素の分子存在比に関するこれまでの多くの研究は、限られた天体に対して単一口径望遠鏡で 1 点観測するものであった。従来の単一口径望遠鏡での観測は、太陽系の大きさの 10 倍以上に相当する 1000 天文単位 (au) 以上の領域を平均化して見ていたため、惑星系形成が起

こっている場所 (100 au 程度) での同位体比を議論することはできなかった。そのため、同位体異常が星間分子雲から原始星および原始星円盤の形成に伴ってどのように変わり、星・惑星系にどのように取り込まれるかという系統的な理解には至っていない。重水素に関しては、様々な進化段階にある星形成領域を観測することによって重水素濃縮の進化を統計的に調べる研究が進められてきたが、ひとつのコアの中で分子雲環境の残る外側の領域から実際に原始星円盤や惑星系が作られる内側にかけて同位体比がどう変化するかという点はわかっていない。また、 ^{13}C 同位体比異常については、これまで限られた天体の限られた分子種で研究されたのみである。そこで我々はおうし座にある低質量 (太陽型) 星形成領域 L1527 に着目し、この天体での ^{13}C 同位体比異常の包括的理解と重水素濃縮の変化を明らかにする研究を行なった。

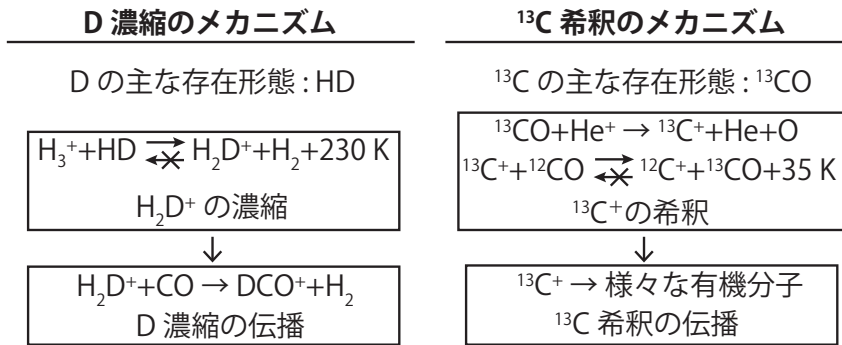


図 1: 低温の星間分子雲における重水素化分子の濃縮および ^{13}C 同位体の希釈のメカニズム

1000 au スケールにおける化学組成と同位体比異常

我々はまず L1527 のラインサーベイ観測を行った。ラインサーベイ観測とはある周波数範囲を網羅的に観測するものである。その範囲における分子の回転輝線が無バイアスに検出することが可能であり、天体の化学組成の包括的理解に役立つ。野辺山 45 m 望遠鏡を用いた 3 mm 帯 (80–116 GHz) のラインサーベイ観測により、243 本の分子輝線を検出し、69 種の分子種を同定した (図 2)。代表的な星なしコア TMC-1 や星形成領域 IRAS 16293-2422 の化学組成との比較により、L1527 は C_nH ($n = 2, 3, 4, \dots$) などの不飽

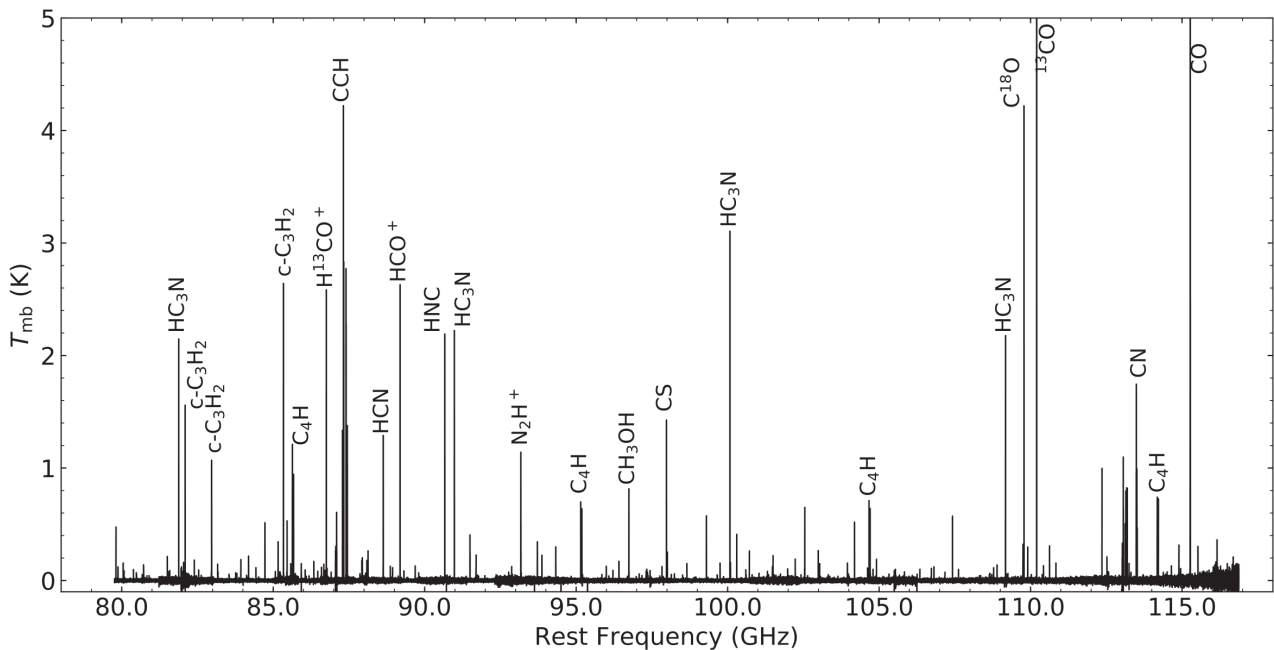


図 2: 野辺山 45 m 望遠鏡による L1527 のラインサーベイ観測

和炭素鎖分子に富み、 HCOOCH_3 や $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ などの比較的複雑な有機分子が少ないことが確認された。また CO , CN , CCH , HC_3N , $c\text{-C}_3\text{H}_2$ の ^{13}C 同位体種を検出し、 CCH , HC_3N , $c\text{-C}_3\text{H}_2$ の ^{13}C 同位体種の希釈を確認した。これらの分子は C^+ を起源として生成されると考えられており、図 1 右のメカニズムが働いていると考えられる。一方で ^{13}C のリザーバーである CO や ^{13}C 希釈が起こる前に作られると考えられている CN は ^{13}C 同位体比種の希釈を示さず、炭素鎖分子種に選択的に ^{13}C 希釈が起きていることがわかった (^{13}C 分別)。また主に炭素鎖分子について重水素化物が検出され (CCD , DC_3N , $c\text{-C}_3\text{HD}$)、数%の重水素濃縮度を示した。中でも、 HDCS , D_2CO , $c\text{-C}_3\text{D}_2$ は高い重水素濃縮度を示した (第 3 章)。

次に、L1527 における ^{13}C 同位体比異常の理解を深めるため、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子と H_2CO 分子についてさらに観測と解析を行った。野辺山 45 m 望遠鏡によるラインサーベイ観測に加え、IRAM 30 m 望遠鏡で行われた 1-3 mm 帯のラインサーベイ観測を精査したところ、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子 (図 3) の輝線が 41 本検出された。その 2 種類の ^{13}C 同位体である $c\text{-}^{13}\text{CCCH}_2$ 、 $c\text{-CC}^{13}\text{CH}_2$ についても輝線がそれぞれ 9 本および 19 本検出され、それらの $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比を調べたところ、元素における $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比より 2 倍以上高いことがわかった (図 3)。さらに、2 つの同位体種間で $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比が異なることも示した。これにより、この分子が生成される反応において、分子中の炭素原子が非等価であることが明らかになった。この分子の主な前駆体として考えられている $c\text{-C}_3\text{H}_3^+$ からはこのような非等価性が生じないため、他の生成経路を考える必要がある。このように $c\text{-C}_3\text{H}_2$ というやや複雑な分子についても ^{13}C 同位体の異常が確認された。

H_2CO 分子はより大きな有機分子の形成の種となる重要な分子である。その生成過程として、星間塵上での CO の水素付加反応と気相反応の 2 つが考えられているが、どちらがどれほど分子の生成に寄与しているかはよくわかっていない。そこで、 ^{13}C 分別の観点から生成過程への示唆を与えるため、IRAM 30 m 望遠鏡で観測を行った。ノーマル種の輝線は周囲のガスによる吸収の影響を受けており、その存在量を直接求めることは難しいため、 ^{13}C 同位体種と ^{18}O 同位体種の輝線から H_2CO 分子の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比を推定したところ、 CO の比と同様に ^{13}C 希釈を示していないことがわかった。これは、星間塵上での CO の水素付加反応から予想される $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比と矛盾しない結果である (第 4 章)。

野辺山 45 m 望遠鏡によるラインサーベイ観測と追加観測により、L1527 における 1000 au スケールにおける ^{13}C 同位体種希釈の全体像が明らかになった。これまでの ^{13}C 同位体異常の研究は、主にいくつかの星なしコアにおいて HC_3N 分子を中心に調べられてきた。今回明らかになった L1527 での ^{13}C 同位体種希釈の度合いとこれまでの星なしコアでの希釈度合いの間には明らかな違いは見られなかった。星形成による ^{13}C 同位体種異常の進化の理解には他の星形成領域における観測が必要である。

		$c\text{-C}_3\text{H}_2$	$c\text{-}^{13}\text{CCCH}_2$	$c\text{-CC}^{13}\text{CH}_2$
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比	観測値		310 ± 80	61 ± 11
	予想値		60-70	30-35

図 3: $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子とその ^{13}C 同位体の構造および $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比の観測値と元素における $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比から予測される値

100 au スケールにおける重水素濃縮度の変化

分子雲から星形成領域にかけての重水素濃縮度の進化を探るため、L1527 に対して H_2CO および CCH とその重水素化物 (HDCO , D_2CO , CCD) をアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) を用いて高空間分解能で観測した。その結果、 H_2CO が原始星近傍 250 au に集中して存在しているのに対し、重水

素化物 (HDCO , D_2CO) は原始星から 1000 au 程度離れた領域にも広がって存在していることがわかった (図 4)。 H_2CO 分子の重水素濃縮は原始星のエンベロープの外側で顕著であり ($\text{D}_2\text{CO}/\text{H}_2\text{CO} = 0.8$)、原始星近傍では低くなっていた ($\text{D}_2\text{CO}/\text{H}_2\text{CO} < 0.04$)。重水素濃縮度が原始星近傍で低下する傾向は CCH 分子についても確認された。 H_2CO 分子は星間塵上で CO の水素 (重水素) 付加により生成された後、星間塵上から気相中に昇華すると考えられる。また、 CCH は星間塵上で作られた CH_4 が気相中に昇華した後、気相反応を経て生成されると考えられている。星間塵上で水として存在する分子は原始星近傍で原始星に暖められて一気に気相中に昇華するため、気相の重水素濃縮度は星間塵上の水全体の重水素濃縮度を反映している。重水素濃縮度は星なしコア期の低温 ($\sim 10\text{ K}$) かつ高密度 ($> 10^5\text{ cm}^{-3}$) の環境で効率よく進行するが、水自体は重水素濃縮度が進行する以前の段階から作られるので、水全体の重水素濃縮度は低いと考えられる。一方でエンベロープの外側 1000 au では重水素濃縮度が進む条件が満たされ、 D_2CO や CCD が効率よく生成されていると考えられる (第 5 章)。今回の結果は原始星エンベロープにおける重水素濃縮度の変化を 100 au スケールで明らかにしたはじめての観測研究であり、星間塵からの蒸発がその原因となっていることを示した点で大きな意義がある。また重水素濃縮の原始惑星系への伝播を考える上でも重要な知見である。

原始星近傍における化学組成はその母体となった星なしコアの性質や原始星の物理状態によって大きく異なる。本研究の成果をふまえ、他の原始星で様々な種類の分子の同位体比がどのように振る舞うかを調べることで、今後分子の同位体比進化の普遍的性質を探る上で重要である。

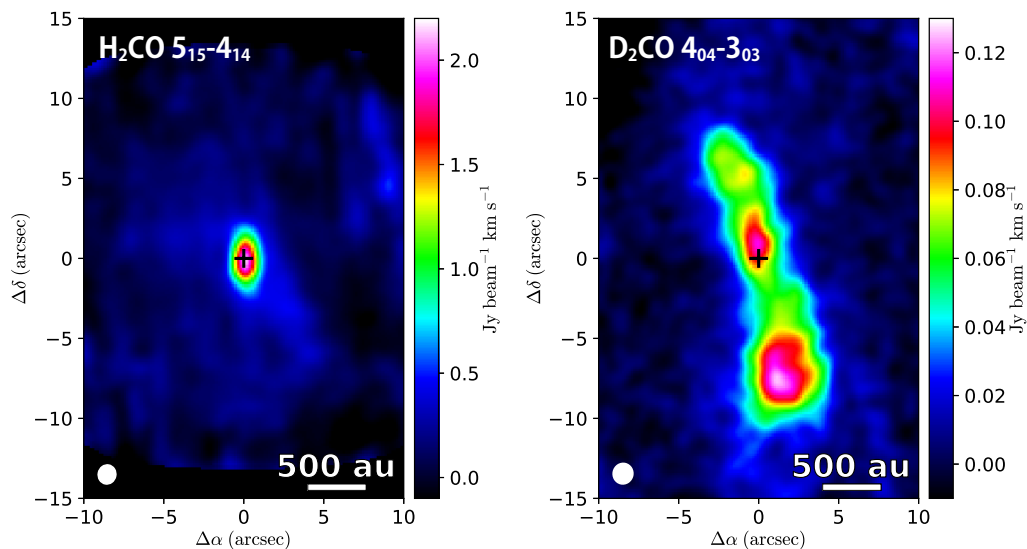


図 4: ALMA で観測された L1527 における H_2CO ($5_{15}-4_{14}$ 輝線) および D_2CO ($4_{04}-3_{03}$ 輝線) の積分強度図