

論文内容の要旨

論文題目 **The Behavior of the Deuterated Species after Birth of Protostars**
(原始星形成にともなう重水素化合物の振る舞い)

氏名 柴田 大輝

星形成は宇宙における最も基本的な構造形成過程であり、太陽系の起源に直結する宇宙物理学の重要な課題として研究がなされてきた。これまで、星形成における星なしコアの進化の段階のトレーサーとして、重水素濃縮という現象が広く用いられてきた。これは、低温の星間分子雲において、分子に含まれる重水素と水素の存在量の比が、宇宙存在量の比よりも大きくなる現象である。これは、星間分子雲中で重水素化合物の生成元となる H_2D^+ が $\text{H}_3^+ + \text{HD} \rightarrow \text{H}_2\text{D}^+ + \text{H}_2$ の反応で作られるためである。これは 230 K の発熱反応であり、低温下では逆反応が起こらない。また、20 K 以下の状態では H_2D^+ の主要な破壊源である CO がダストに吸着し、気相からなくなるため、より重水素濃縮が進む。

これまで星なしコアに対して重水素濃縮は詳しく研究がされてきたが、原始星形成後の重水素濃縮の研究は限られている。原始星が形成されると周囲の温度が上昇し、 H_2D^+ の生成の逆反応が起こる。さらに、気相から CO が蒸発することで、 H_2D^+ が破壊される。このため、重水素濃縮度が減少すると考えられる。

原始星形成後の重水素化合物の振る舞いについて調べるために、低質量原始星形成領域 L1551-IRS5、L483、NGC1333-IRAS2A、IRAS16293-2422、L1251A に対して、野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて重水素化合物の観測をおこなった。観測した分子は DCO^+ 、 H^{13}CO^+ 、 HC^{18}O^+ 、 N_2D^+ 、

N_2H^+ 、 DNC 、 HN^{13}C 、 DCN 、 H^{13}CN 、 HC^{15}N 、 HCN の $J=1-0$ 輝線である。観測は、 N_2D^+ 以外の分子は原始星を中心とした 3×3 の 9 点を観測した。 N_2D^+ は原始星を中心とした 5 点を観測した。それぞれの点に対し、重水素濃縮度 $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$ 、 $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 、 DNC/HNC 、 DCN/HCN を計算した。また、L483、NGC1333-IRAS2A、IRAS16293-2422 に対しては ASTE 10 m 望遠鏡を用いて $\text{DCO}^+(J=5-4)$ 、 $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=4-3)$ 、 $\text{DCN}(J=5-4)$ 、 $\text{H}^{13}\text{CN}(J=4-3)$ の観測も行った。また、SMA 干渉計のアーカイブデータも用いた。

その結果、L1551-IRS5、L483、NGC1333-IRAS2A において、中性分子の重水素濃縮度 DNC/HNC とイオンの重水素濃縮度 $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$ が異なる振る舞いをする事がわかった。イオンの重水素濃縮度が原始星方向で減少しているのに対し、中性分子の重水素濃縮度にはそのような傾向が見られなかった。重水素濃縮度の振る舞いを定量化するために、dip depth というパラメータを定義し、計算を行った。これは、原始星方向の重水素濃縮度 R_{in} 、および周囲の点の重水素濃縮度の値の平均値 R_{out} に対し、 $\text{dip depth} = (R_{\text{out}} - R_{\text{in}})/R_{\text{out}}$ と定義したものである。これは、周囲の点に対して原始星方向の重水素濃縮度がどれだけ激しく減少しているかということを意味する。 $D > 0$ であれば原始星方向で重水素濃縮度が減少しており、 $D < 0$ であれば原始星方向で高くなっている。表 1 はその結果を表す。ここには、 R_{out} として周囲の 8 点すべてを考慮したものほかに、各方向 (1, 5, 9 方向、2, 5, 8 方向、3, 5, 7 方向、4, 5, 6 方向) ごとに計算した値も示す。これをみると、L1551-IRS5、L483、NGC1333-IRAS2A に対しては、 $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$ 比、 $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 比は 0 より大きく、重水素濃縮度が原始星方向で減少していることがわかる。また、中性分子の dip depth は 0 もしくは 0 以下であり、重水素濃縮度が原始星方向で減少していないことがわかる。このように、イオンと中性分子で、重水素濃縮度に異なる振る舞いを示すことがわかった。

この理由を以下のように、重水素化合物の破壊反応で解釈した。 DCO^+ は主に電子との解離性再結合反応によって破壊される。このタイムスケールは 100 年程度である。また、 N_2D^+ は CO との反応で破壊され、破壊のタイムスケールは 1 年以下である。これは、星形成のタイムスケール (10^4 年程度) と比較するとはるかに短い。そのため、原始星が形成されるとイオンの重水素化合物は即座に破壊される。この影響が L1551-IRS5 の $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$ 比、 $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ 比、および L483、NGC1333-IRAS2A の $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$ 比が原始星方向で減少する理由である。一方で、中性分子の DNC 、 DCN は He^+ や H^+ 、 H_3^+ とのイオン交換反応で破壊される。この破壊のタイムスケールは 10^4 年から 10^5 年程度であり、イオンの破壊のタイムスケールよりもはるかに長い。また、原始星の年齢と同程度である。そのため、中性分子の重水素化合物は原始星形成後もしばらく破壊されずに残っている。L1551-IRS5、L483、NGC1333-IRAS2A で DNC/HNC 比が原始星方向で減少していなかったのはこのためと考えられる。

また、IRAS16293-2422、L1251A に対しては重水素濃縮度の明確な減少が見られなかった。L1251A は輝線が弱く、誤差が大きくなった。また、IRAS16293-2422 は Class 0 に分類される原始星で、若い進化段階にある。そのため、原始星周囲に低温のエンベロープが多く存在し、観測ではその影響を大きく受けたと考えられる。エンベロープの影響を除くために、原始星の速度構造に注目した。図 1 左図は、IRAS16293-2422 の DCO^+ と H^{13}CO^+ のスペクトルを重ねたものである。本来であれば DCO^+

1	4	7
2	5	8
3	6	9

position

天体	方向	イオン種		中性分子	
		DCO ⁺ /HCO ⁺	N ₂ D ⁺ /N ₂ H ⁺	DNC/HNC	DCN/HCN
L1551-IRS5	total	0.43(25)	0.58(28)	0.40(52)	
	1, 5, 9	0.55(25)		0.39(32)	
	2, 5, 8	0.37(25)	0.65(34)	0.50(49)	
	3, 5, 7	0.43(28)		0.51(96)	
	4, 5, 6	0.28(21)	0.43(20)	0.02(16)	
L483	total	0.23(14)		-0.10(13)	0.07(14)
	1, 5, 9	0.26(14)		-0.14(12)	0.06(13)
	2, 5, 8	0.17(13)		-0.09(12)	0.05(13)
	3, 5, 7	0.23(17)		-0.14(15)	0.03(19)
	4, 5, 6	0.25(13)		-0.04(12)	0.15(14)
NGC1333-IRAS2A	total	0.30(27)		0.16(36)	
	1, 5, 9	0.34(31)		0.24(44)	
	2, 5, 8	0.35(23)		0.15(30)	
	3, 5, 7	0.34(28)		0.21(45)	
	4, 5, 6	0.12(26)		-0.04(27)	

表 1: 各天体、重水素濃縮度に対する dip depth の値。ここで、0 よりも大きいものについては、イオン種は赤、中性分子は青で示している。また、左の 3×3 の数字は観測位置を模式的に示したもので、中心の観測点 5 が原始星の位置を示す。

は超微細構造を持ち、H¹³CO⁺よりも線幅が太くなるはずである。しかし、図 1 左図は H¹³CO⁺の線幅は DCO⁺よりも太いことを示している。原始星は重力収縮をしており、原始星近傍のガスの速度は落下や回転の影響をうけるため、エンベロープに比べてはるかに早い。そのため、分子輝線のスペクトルの系統速度から離れた部分は原始星近傍の分子による輝線を表わす。図 1 右図は DCO⁺のスペクトルから H¹³CO⁺のスペクトルを引いたものである。これを見ると、系統速度 ($v = 4$ km/s) から離れた部分にへこみがある。このことは、原始星付近で DCO⁺が破壊されていることを意味する。

また、SMA 干渉計のアーカイブデータを用いた解析により、IRAS16293-2422 に対してイオンと中性分子の重水素化合物の振る舞いの違いが見られた。図 2 は、IRAS16293-2422 周囲の DCO⁺ ($J=3-2$) 輝線、N₂D⁺ ($J=3-2$) 輝線と DCN ($J=3-2$) 輝線の分布である。DCN の重水素化合物が原始星周囲に集中しているのに対し、DCO⁺、N₂D⁺の重水素化合物が原始星から離れた位置に広く分布している様子が見られた。これは、DCO⁺、N₂D⁺が原始星近傍で破壊されている一方で、DCN が原始星近傍で破壊されていないことを意味する。

また、L483 に対しては、HNC/HCN 比の分布が得られた。HNC/HCN 比は原始星方向で低く、イオンの重水素濃縮と似た傾向を示した。HNC は反応性が高い分子である。温度が高い領域では HNC は HCN に変化し、原始星の周辺では HNC/HCN 比が減少することが予想される。この結果は、原始星周りで HNC が HCN に変化している様子を反映している可能性がある。

以上のように、原始星形成後、イオンの重水素化合物は即座に破壊され、イオンの重水素濃縮度は減少する。一方で、中性分子の重水素化合物は、原始星形成後もしばらく破壊されず、高い重水素濃縮度を保ち続けることがわかった。これは、中性分子の重水素濃縮度が、原始星形成過程の初期条件、原始星形成後の多様性の起源を知る手がかりになる可能性を意味する。

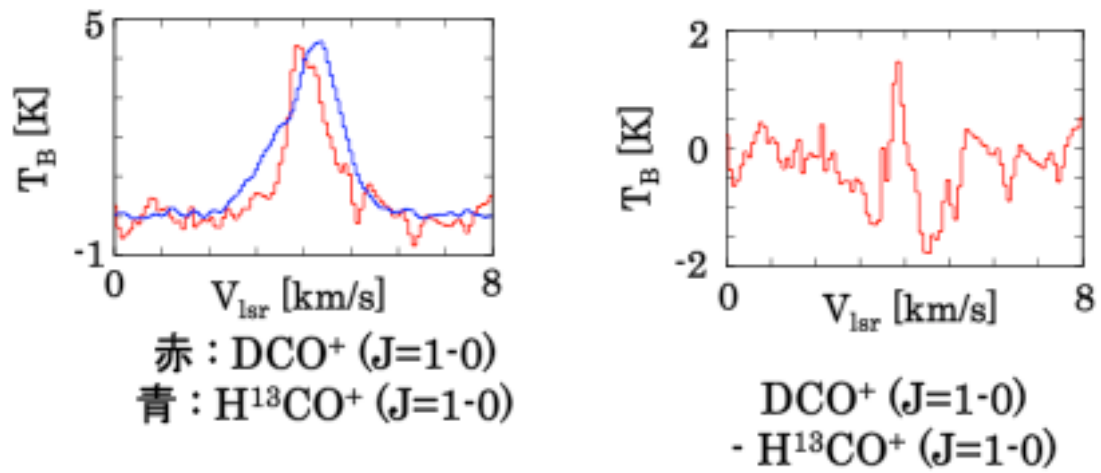


図 1 : IRAS16293-2422 に対するスペクトル。

(左) $\text{DCO}^+ (J=1-0)$ 輝線と $\text{H}^{13}\text{CO}^+ (J=1-0)$ 輝線を重ねたもの。

(右) $\text{DCO}^+ (J=1-0)$ 輝線から、 $\text{H}^{13}\text{CO}^+ (J=1-0)$ 輝線を引いたもの。

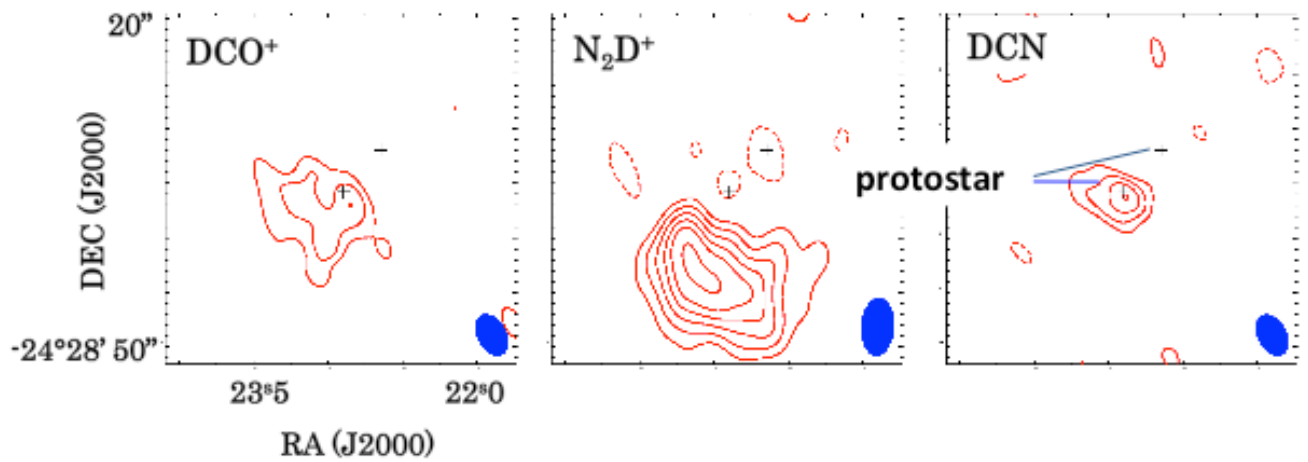


図 2 : SMA 干渉計のアーカイブデータの解析によって得られた、IRAS16293-2422 に対する積分強度図。