

(岡山大理) 川口 建太郎

【序】これまで120以上の分子種が星間空間、晩期型星周辺部で検出されている。その生成反応として [1] イオン・分子反応、[2] 星間ダスト上での反応、[3] 中性・中性分子反応、[4] 星形成領域におけるショック波や Outflow (原始星からの物質の流れ) によって誘起される反応、[5] 宇宙線 (高エネルギー (> 100 MeV) のプロトン) による H_2 , He のイオン化およびそれに引き続いて起こる反応、が考えられている。また低密度雲や晩期型星周辺部の密度の低いところでは [6] 光分解反応の寄与が大きく、CN, CCH ラジカルなどが生成している。

イオン・分子反応は活性化エネルギーなしに速い速度で進行するので、低温での分子生成に重要な役割を担っている。実際 HCO^+ , $HCNH^+$ 等のイオン種が検出されている。また HCN に対する HNC のような準安定状態の分子が多数検出されている事は、前駆体としてイオン種を仮定し、電子との再結合反応過程で生成する機構で説明される。

[3] の中性・中性分子反応は通常大きな活性化エネルギーを必要とするため、低温の星間空間では一般にはおこりにくいが、ラジカルと不飽和分子の反応やラジカル・ラジカル反応の中には活性化エネルギーなしに進行するものがある。様々な提案がなされているが、実際のどの程度の寄与があるのか定量的には見積もられていない。そして、依然、イオン・分子反応が主と考えられる傾向が強い。ここでは HC_3N 分子を例に低温の星間空間における反応と、水素分子との衝突により励起される分子の回転準位の問題を考える。上記の [4] は星間空間でも比較的、温度が高い所で重要になり、また暗黒星雲を考えるので [6] の効果は雲の周辺部のみで効くのでここでは考慮しない。

【イオン・分子反応と中性・中性分子反応】

直線状のシアノポリイン分子 HC_nN ($n=1,3,5,7,9,11$) は暗黒星雲、晩期星周辺部で観測される代表的な分子である。その中で HCCCN にはエネルギーの低い順に HCCNC (0.8 eV), HNCCC (2.2 eV), HCNCC (3.7 eV) の準安定状態の異性体 (括弧内に HCCCN とのエネルギー差を示す) が存在する。それらの暗黒星雲 TMC-1 ($T_k \approx 10$ K) での存在量を柱密度により図1に示す。

準安定状態の異性体が 10 K 程度の低温下で生成するには、前駆体として $HCCCNH^+$, $HCCNCH^+$ と電子との再結合反応が最も寄与が大きいと考えられる。観測では HCCCN に比べて HNCCC の存在量は非常に少ない。 ($[HNCCC]/[HCCCN]=0.0024$)
そこで、大部分の HCCCN は $CN+HCCH \rightarrow HCCCN+H$ (1) で生成すると仮定された¹。
長村のグループによる理論計算では反応(1)は活性化エネルギーなしに進行できることが示された²。また長村らは



も活性化エネルギーなしに進行する

事を指摘した。Balucani 等の交叉分子線実験でも反応(1)が研究された³。低温領域では重い同位体種を含む分子の存在量が増加する。主な理由は同位体種間の振動の零点エネルギーの差が、反応している所の温度に比べて無視できないほど大きいからである。高野等は HCCCN の同位体種の観測により、 $HCC^{13}CN$ の存在量は $HC^{13}CCN$, $H^{13}CCCN$ に比べて、1.4 倍多いことを見出した⁴。 $HC^{13}CCN$ と $H^{13}CCCN$ の存在量にほぼ同じであった。これは、イオン・分子反応では説明し難く、反応(1)により進行していることを示唆する。すなわち CN 基における ^{13}C の濃縮がアセチレンとの反応でもそのまま維持されている。 HC_5N における観測は信号対雑音比が悪く、確定

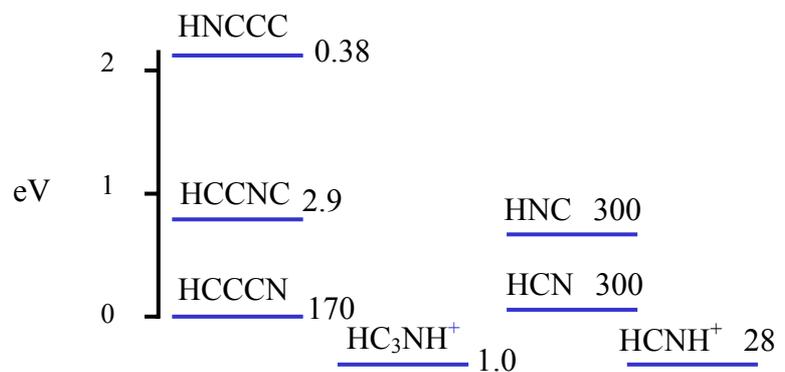


図1 HCCCN, HCN と異性体種のエネルギー関係, 数値はおうし座分子雲 TMC-1 における存在量を柱密度 $10^{12}/\text{cm}^2$ 単位で示す。

していないが、CN 基の ^{13}C 種が強い傾向は認められる。この場合は $\text{CN} + \text{HC}_4\text{H}$ (ジアセチレン) の反応で HC_5N が生成している。一方、もしイオン・分子反応で HC_5N が生成しているのであれば、 HC_5NH^+ の存在量は検出できるほど高いと考えられ、探査を行ったが検出できなかった。

以上の様に、 HC_nN の生成は大部分、中性・中性分子反応による事を示唆するが、 $n=1$ の場合は図 1 に示されるように、準安定状態の HNC が多く、イオン・分子反応が主であると考えなければならないだろう。ではなぜ $n=1$ とそれ以外で大きな違いが生じるのであろうか。

定量的な議論のためには、同位体種の分別化がどこで起こっているかを確認する必要がある。そのため我々は ^{13}CN ラジカルの観測を行った。ところが核スピン・不対電子の相互作用から生じる超微細構造のスペクトル線強度が、理論的に予想される強度と大きく異なって観測された。これは水素分子との衝突断面積が超微細構造準位間で異なっているためと考えられる。

【低温下の分子衝突】

星間分子の純回転遷移として放射されるエネルギーは多数存在している水素分子（雲の密度によっては電子）との衝突によって得られる。密度が低い ($\sim 1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$) 星間空間では回転準位間は必ずしも熱平衡になっていないので、観測スペクトル線強度を理解するためには、分子雲からの **Escape Probability** を考慮した励起計算が必要である。その場合、最も大きな不確定さは水素分子との衝突断面積である。それらは温度依存性を持ち、低温での値を実験的に求めることが難しいので、多くは理論計算から導かれる。通常、衝突相手を He と仮定して、（星間空間ではパラ水素が大部分である。）**Potential energy surface** を計算し、各運動エネルギー温度で衝突断面積が求められる。 H_2 と CO の衝突の場合、20%以上の信頼性があると言われているが、大きな分子に対しては、より大きな誤差を覚悟しなければならないだろう。最近、**De Lucia** のグループ

(**Columbus**) は 2-80 K の温度範囲でスペクトル線の圧力幅の測定を可能にして、理論計算との相互比較ができるようになってきた。 H_2CO 分子の K-型二重項遷移 ($1_{11}-1_{10}$, $2_{12}-2_{11}$ それぞれ 5 GHz, 14 GHz) が H_2 密度 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ の場合、吸収線として観測される事を説明することに成功している。一方 $\Delta J=1$ の通常の遷移は発光として観測されるので、熱平衡が成立していないことを意味する。それゆえこの計算は表 1 の C_{2v} 対称性分子におけるオルソ・パラ存在量比を求める場合にも必須である。その比は分子の生成機構について、貴重な情報を与える。イオン・分子反応で生成する場合は、特別な場合 (**cyclic- C_3H_2** 分子が 3 より小さい O/P 比を持つ等) を除いて、統計的値 3 となる。分子がダスト (グレイン) の固相から生成する場合、ダストの温度に依存する比を持つと考えられる。 H_2CO 型の分子では、 $\text{K}=0$ と $\text{K}=1$ のエネルギー差が 15 K に相当するため、ダストの温度が 10 K 程度だと、オルソ・パラ比が 2 程度になる。表 1 で H_2CS の比が 3 より小さな値となっている。これまで **TMC-1** のような低温の雲では分子がダストから離脱する機構が考えにくかったが、最近、**TMC-1** の比較的小さな領域で、分子組成が大きく変化していることが見出され、クランプ (分子雲の中の小さな塊) 同士の衝突により、**MHD** 波が生じ、ダストからの分子離脱に関係しているのではとの提案がなされている⁵。ダスト起源の H_2CS であれば、O/P 比は小さくなり観測と一致するが、 H_2CO の場合との違いは何かなど問題が残っている。

表 1. 暗黒星雲 **TMC-1** でのオルソ・パラ存在量比

H_2CO	2.8 ± 0.7
H_2CS	1.8 ± 0.3
H_2CCO	3
cyclic- C_3H_2	2.4 ± 0.2
H_2CCC	3.3 ± 0.6
H_2CCCC	3.3 ± 1.1

文献

1. K. Kawaguchi, S. Takano, M. Ohishi, S. Ishikawa, K. Miyazawa, et al., *ApJ*, 396, L49(1992)
2. K. Fukuzawa, and Y. Osamura, *ApJ*, 489, 113 (1997)
3. N. Balucani, O. Asvany, L. C. L. Huang, Y. Lee, R. I. Kaiser, Y. Osamura, et al., *ApJ*, 545, 892 (2000)
4. S. Takano et al. *A&A*, 329, 1156(1998)
5. J. E. Dickens, W. D. Langer, & T. Velusary, *ApJ*, 558, 693 (2001)