

17P/ホームズ彗星のシアン化水素とシアン中における
過剰量の重窒素

LARGE EXCESS OF HEAVY NITROGEN IN BOTH HYDROGEN CYAN AND CYANOGEN FROM
COMET 17P/HOLMES

D. BOCKELEEE-MORVAN, N. BIVER, E. JEHIN, A. L. COCHRAN, H. WIESEMEYER,
J. MANFROID, D. HUTSEMEKERS, C. ARPIGNY, J. BOISSIER, W. COCHRAN, P. COLOM,
J. CROVISIER, N. MILUTINOVIC, R. MORENO, J. X. PROCHASKA, I. RAMIREZ, R. SCHULZ, AND
J.-M. ZUCCONI

要約

木星族彗星である 17P/ホームズ彗星が、2007 年 10 月 24 日に大アウトバーストを起こした直後の振る舞いのミリメートル (訳注: マイクロ波) 観測や光学観測により、我々は HCN 中の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 同位体比 = 139 ± 26 と、CN 中の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 同位体比 = 165 ± 40 を得た。これらは HCN が CN と同じく、地球上にない同位体組成であることを証明する。同じ結論が長周期彗星である C/1995 O1 (ヘールボップ彗星) の以前に出版された測定を、長期間に渡る再解析をすることで得られる。これらの結果は、HCN が彗星大気中の CN の最も重要な親分子であるということに矛盾ない。地球大気中の値より ^{15}N の量が多いことは、原始太陽系星雲中の N を含む揮発性分子が、太陽系の形成におけるいくつかの段階において、重要な N の同位体分別を受けたことを示している。HCN 分子は、オールトの雲やカイパーベルトの彗星に取り入れられる前に、原始太陽系星雲中の窒素の存在する主だった場所と同位体的に決して釣り合わなかった。HCN や CN 中の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ の同位体比は、地球上の値と一致すると測定された。

1 序論

彗星は氷、有機物、鉱物からできており、それらは 46 億年前に凝集した場所である、原始太陽系星雲の外周の化学組成の記録である。彗星の成分の解析は、太陽系形成の初期段階や、原始太陽系星雲の形成に先立つ誕生に関わる分子雲に起きた、化学的、物理的過程の重要な手がかりを与えてくれる。(Ehrenfreund et al. 2005) 特に、彗星の揮発物質中の同位体比は、同位体の分別が化学的、物理的状況に敏感であるゆえ、どのようにこの物質が形成されたかを診断するのに重要な役割を果たす。しかし、このような測定はめったにない。いくつかの彗星コマ中の H_2O や HCN ガスに、重水素がとても多いことが観測される。これは低温における星、あるいは原始太陽系の化学的性質の特徴である。(Ehrenfreund et al. 2005;

Bockelee-Morvan et al. 2005) 反対に、CN 中の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ の同位体比の値が、地球外で一様であり (Arpigny et al. 2003; Hutsemekers et al. 2005; Manfroid et al. 2005; Jehin et al. 2004)、彗星の大気中の CN ラジカルより推定すると、HCN 中のこの比が地球上と同じであると測定されたとき、それはまた星間のような化学性質を指し示している (Jewitt et al. 1997; Ziurys et al. 1999)、との説明の仕方には疑問がある。ここに我々は、マイクロ波スペクトル観測による 17P/ホームズ彗星の $\text{HC}^{14}\text{N}/\text{HC}^{15}\text{N}$ と $\text{H}^{12}\text{CN}/\text{H}^{13}\text{CN}$ の同位体比の測定を、可視光スペクトル観測による $\text{C}^{14}\text{N}/\text{C}^{15}\text{N}$ と $^{12}\text{CN}/^{13}\text{CN}$ と共に示す。木星族彗星であるこの短周期 (6.9 年) 彗星の明るさは 2007 年 10 月 24 日、地球から 1.63AU、太陽から 2.44AU で予想外に増加した。(可視等級 $m_v=17$ 等から $m_v=2.5$ 等) (Green 2007) この巨大なアウトバースト現象は、おそらく核の突然の分裂に関係していて、続いて大量の粒子の生成を伴い、相

補的に(訳注:マイクロ波と光学観測を)用いること 会を我々に与えてくれる。
 で微量の同位体の僅かなスペクトル信号を探る機

表1 電波と17P/ホームズ彗星の分子生成率の特徴

Molecule	Line	Frequency (GHz)	Date UT (2007 October)	Int. Time (minutes)	Line Area (K km s ⁻¹)	Opacity	Column Density (10 ¹² molecules cm ⁻²)	Production Rate (10 ²⁶ molecules s ⁻¹)
HCN	$J = 3-2$	265.886434	27.96-27.98	15	18.23 ± 0.14	0.56	20.8 ± 0.17	19.85 ± 0.16
	$J = 3-2, F = 2-2$	265.888516	27.96-27.98	15	0.958 ± 0.083	0.03	20.7 ± 1.8	19.74 ± 1.71
	$J = 3-2, F = 3-3$	265.884883	27.96-27.98	15	1.097 ± 0.073	0.03	23.7 ± 1.6	22.60 ± 1.50
H ¹³ CN	$J = 3-2$	259.011798	28.08-28.19	90	0.220 ± 0.037	0.008	1.74 ± 0.30	0.164 ± 0.028
HC ¹⁵ N	$J = 3-2$	258.156996	27.96-28.19	145	0.191 ± 0.021	0.006	1.51 ± 0.16	0.140 ± 0.015

記—Off-source に費やした時間を含む総時間(誤差 1σ) (訳注:電波観測は On-source と Off-source というものを切り替えながら行うものらしい);主ビームの強さを温度スケールで表したビーム範囲;円柱密度と生成率は Biver et al.(1999)の放射遷移モデルで、文中で述べたように $X_{ne}=0.5$ 、安定した状態のコマで $T_{kin}=45K$ を用いて決定した。生成率は HCN 全体の遷移線とそれぞれ 6%低い側、6%高い側の、光学的に淡い遷移線 (HCNの超微細な成分である H¹³CN、H¹⁵CN 遷移線)から、Dello Russo et al.(2008)による 2007 年 10 月 27.6 日の HCN の赤外線観測からえられた $T_{kin}=65K$ を用いて決定された。

2 17P/ホームズ彗星の HCN 中の ¹⁴N/¹⁵N 比

我々はシエラネバダ(スペイン)にある IRAM の 30 m望遠鏡を用いて 17P/ホームズ彗星の観測を行った。同位体の測定は 10 月 27-28 日 (UT)に行われた。彗星の追尾は JPL HORIZONS システムより K077/06 の軌道要素を使って行った。望遠鏡の向きは、近傍のクエーサーの繰り返し行われた観測によりチェックされ、更新された。スカイのキャンセルは周期 0.5Hz、振幅幅 3'で副鏡を揺らすことで行った。4つの受信機が同時に動作することができる。265.9GHz にて H¹²C¹⁴N(以後 HCN)、H¹³CN (259.0GHz)、H¹⁵CN(258.2GHz)の $J=3-2$ の回転遷移線が測定された。(表.1)9.5"のビーム径(半電波強度ビーム幅)は、彗星の距離では 11,300 km に相当する。観測は良好な大気状態(可降水量 3-5mm)にて行われた。回転遷移線は低スペクトル解像(1 または 2MHz)、高スペクトル解像(62k Hz)両方で観測された。スペクトルは図1, 2に示されて遷移線の範囲は表 1 に与えられている。HCN、H¹³CN、H¹⁵CN の観測は全く同時に行われたのではなかった(表1)しかし、彗星の活動をモニターする方法として、いくつかの強い遷移線(CS $J = 3-2$,

CH₃CN $J = 8-7$ [147Ghz], CH₃OH $J = 3-2$ [145GHz]の遷移線)は途切れなく観測された。これらの強度は HCN、H¹³CN、H¹⁵CN のデータが得られた観測期間中(5.5 時間強)12%減少した。この変動は同位体比を得るときに考慮された。

(翻訳担当:篠田知則)

HC¹⁵N と H¹³CN のラインとは対照的に、HCN $J=3-2$ は光学的に厚い(表 1)。そのため、HCN $J=3-2$ ラインが分析の中で使用される時、放射遷移モデルが HCN/H¹³CN および HCN/HC¹⁵N の同位体比を調査するために必要になる。ホームズ彗星のコマは、氷粒子から放出された気体を伴ったアウトバーストに続く非平衡状態にあった。コマ構造上避けることの出来ない単純化したモデルの仮定は、調査において系統的に不透明な従属エラーを導入し、同位体比の決定に影響する。一方、HCN $J=3-2$ ラインは、6つの超微細成分[hyperfine components]へ分離している。それらのうちの二つ ($F=2-2$ と $F=3-3$)はラインの中心からよく分離しており、HCN スペクトル中に検知される(図 2;表 1)。これらの超微細成分は合計強度 3.7%の固有線を持っていて、超微細な統計的重みに依存する。そしてこれらは光学的に薄い(表 1)。HCN の光学的に

薄い超微細成分を用いて決定される HCN/H¹³CN と HCN/HC¹⁵N の存在比は、コマ上の温度、構造、時間的可変性のモデル仮定に依存しない。これは同じ励起状態にあり、かつコマの同じ領域の分子による輝線が比較されるためである。ラインの周波数がわずかに異なることを説明するために、軽微な修正を伴うものの、それらはライン強度比から直接与えられる。HCN 超微細成分の使用と HCN, H¹³CN, HC¹⁵N の非同時性を補正した計測により、H¹²CN/H¹³CN = 114 ± 26 と H¹⁴CN/HC¹⁵N = 139 ± 26 が導出された。Biver et al. (1999) の放射遷移モデルにより決定される円柱密度と生成率を表 1 で与える。

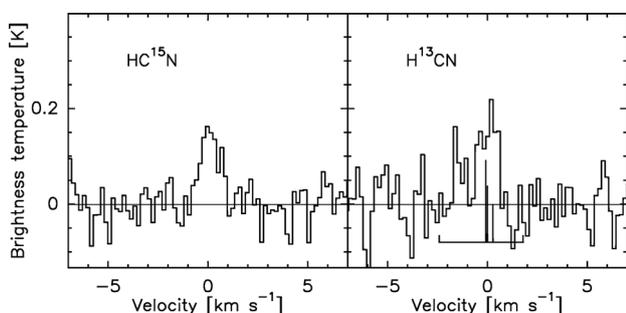


図 1. 2007 年 10 月 27-28 日の 17P/Holmes 彗星中の HC¹⁵N と H¹³CN の $J=3-2$ ラインのスペクトル。速度座標は彗星の静止速度を考慮している。H¹³CN $J=3-2$ ラインの超微細成分の位置と相対強度を示している。

ガス速度 0.56 km s⁻¹、10 月 29.0 日 UT での IRAM による CH₃OH 多重ラインの観測により推定されるガス運動温度 T_{kin} 45 K を用いて、定常状態の同位体親分子の分布を仮定した。興味深いことに、 $J=3-2$ ライン全体から推定される HCN 生成率を使用して得られた同位体比は、これらの独立した超微細ラインモデルの手法の使用により得られたものと類似している。図 2 で示されるように、日中側と夜間側の HCN 速度が 0.6 と 0.4 km s⁻¹ に固定される時、そのモデルにより HCN ラインの形状に十分に合致する。これは HCN の空間分布や励起についての我々の言及が、第一の近似値として正しいことを示している。10 月 27.6 日より小さなアパーチャ

で測定された HCN 生成率と、この仕事での報告書とが良く一致していることにより、この結論は支持される。

3 17P/ホームズ彗星の CN 中の ¹⁴N/¹⁵N 比

CN 中の ¹⁴N/¹⁵N と ¹²C/¹³C の比を測定するために高解像度の光学観測が実施された。388 nm での B²Σ⁺-X²Σ⁺(0, 0) の CN バンドスペクトルは、マクドナルド観測所の 2.7 m Harlan J. Smith 望遠鏡の 2D クーデ分光写真機により、2007 年 10 月 25.4, 28.3, 29.4, 30.4, 31.4 日と 11 月 18.4, 19.3 日 UT に取得された。

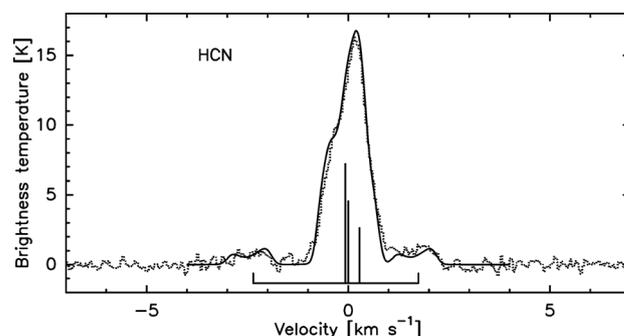


図 2. 17P/Holmes 彗星中に観測された 10 月 27.97 日 UT の $J=3-2$ の HCN ラインプロファイル(破線)に合致するモデル(実線)。超微細成分の位置と相対強度を示している。

また、30 秒から 5 分の短時間露出のシリーズは、2007 年 10 月 29.6 日 UT にマウナケアに設置されている Keck I 望遠鏡の高解像度エッセル分光計により取得された。観測は快晴かつ低いエアマスのもとで行われた。このとき、分光器のスリットは ~ 1" 幅と ~ 7" 長であり、 $\Delta\lambda/\lambda = 60,000$ (0.03 Å pixel⁻¹) の分解能である。スリットはケック分光計の場合、偽の核の中心にあり、マクドナルドの露出 (20 分) では、強いダスト反射光の悪影響を軽減するため、(20" 上)のコマ中に移動した。[¹²C¹⁴N, ¹³C¹⁴N, ¹²C¹⁵N (0, 0) バンドの回転振動ラインの間に存在する] スペクトルラインに横たわるダスト反射光は、適切なドップラーシフト、形状フィッティング、正

規化(Arpigny et al. 2003; Jehin et al. 2004)が行われた太陽の基準スペクトルを差し引く事で除去された。個々の CN (0,0)スペクトルは、全面的な S/N 比を最大限にするために、最適な重み体系(optimal weighting scheme)を足し合わせている。 $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$, $^{13}\text{C}^{14}\text{N}$, $^{12}\text{C}^{15}\text{N}$ の合成スペクトルは、観測環境毎に蛍光モデル(Zucconi & Festou 1985)を用いて計算された。我々は観測期間の日心距離と速度の少量の変化による、わずかに異なる励起状態を計算に取り入れた。衝突の効果は、 $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$ ライン(Manfroid et al. 2005)のフィッティングにより実験的に見積もられる。合成スペクトルはそのデータと同じ手法で足し合わされた(co-added)。同位体混合物は、観測された連続スペクトルの差分に最も適合する様に調節された。我々は図 3 で示すように、7 つの R ブランチ(R3-R9)を考慮した。最後にケック、マクドナルドスペクトルに足し合わされた $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ および $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ の同位対比は、それぞれ 90 ± 20 と 165 ± 40 になると見積もられる。

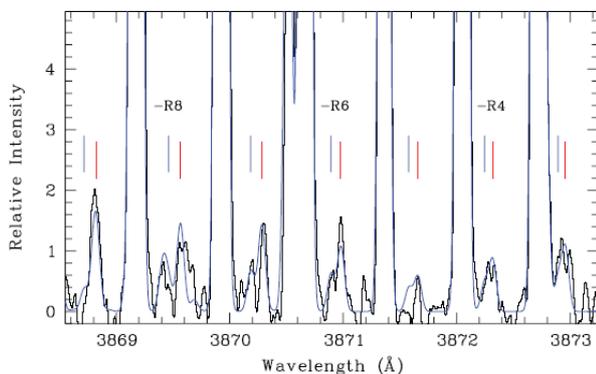


図 3. 7 個の CN 同位体 R ブランチ(R3-R9) (黒線) が現れている 17P/Holmes 彗星の合成されたケック、マクドナルドの CN (0, 0)バンドスペクトルの小部分。太陽を散乱するダストスペクトルは除去されている。 $^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ (赤い破線) と $^{12}\text{C}^{15}\text{N}$ (青い破線) の位置が示されている。メインの同位体の対応するラインは左側にある。 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 90$ と $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 165$ の合成スペクトルが重ねられている(青線)。

(翻訳担当: 鈴木淳嗣)

4 ヘールボップ彗星のデータについて再解析

17P/ホームズ彗星で HCN と CN で測定される $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比は、互いに一致している。対照的に、 $\text{HC}^{14}\text{N}/\text{HC}^{15}\text{N}$ 比については、C/1995 O1(ヘールボップ)彗星は、地球の大気の数値(272)よりわずかに高く(Jewitt et al. 1997; Ziurys et al. 1999)、 $\text{CN}^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 値は、 140 ± 35 であると報告された(Arpigny et al. 2003)。これが、我々にヘールボップ彗星の計測を再度分析させる契機となった。

Ziurys(1999)らの 1997 年 3 月 24、25 日のデータにおいて、我々は再度、解析した。これらの著者によって与えられた、 $\text{HC}^{14}\text{N}/\text{HC}^{15}\text{N}$ は、 100 ± 20 と 286 ± 82 であり、この比の結果と比較すると、(今回)得られた値は、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 65 \pm 13$ と $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 152 \pm 30$ (10%の不確実性を含む)であった。Ziurys らは光学的に厚みのある HCN 線を分析するために近似の公式を使った。そのうえ、HCN の回転温度により不適当な値を呈した。代わりに、我々は完全な放射遷移モデルを用いた。

我々の測定は、より信頼できるものであり、つまり、3月24日の観測結果、HCN線は、5%以内の首尾一貫した結果を示しており、HCN 生成率は、 $J = 1-0, 2-1, \text{および } 3-2$ として得られた。ところが、Ziurys.らの(結果の)ラインから推論される値は、2倍異なる。 HC^{15}N と H^{13}CN の $J=3-2$ 線は、3月25日に観察された。3月24日、3月25日に得られた、HCN 生成の日々変化についてはであるが、 $\text{HC}^{15}\text{N}/\text{H}^{13}\text{CN}$ 比として、 0.43 ± 0.10 であり、3月25日のデータだけでもより確定される(値として)推論された。この場合、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ は、地上の数値である 89 と等しく、 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 207 \pm 48$ と推論される。1997 の Jewitt らのデータは、James ClerkMaxwell Telescope (JCMT)を用いて得られたものである。これは、だれでもカナダ天文データセンターから入手可能である。再解析での我々が得たデータは以下のとおりである。

(1)HCN データは日の出の近くの夜間に得られた、ところが、 H^{13}CN と特に HC^{15}N は昼間に後で観察された。つまり、光線効率、JCMT 仕様に従って

20%の分解であった可能性がある。

(2) HCN 線は二重の側波帯 (DSB) でレーザーB3を調整して観察された、ところが、他の線は単側波帯で観察された。つまり、彗星観察のために使う物と同じレーザーを DSB (両側波帯モード) を用いてチューニングで得られる較正源の HCN スペクトルは、リファレンスとする範囲源に関して、15%を上回る信号を示す。

(3) $\text{H}^{13}\text{CN } J=4-3$ は、345.338538GHz (Lis et al. 1997) において、 $\text{SO}_2 13-12$ 線を混合させる。つまり、ヘールボップ彗星 (Bockele e-Morvan et al. 2000) のために測定される SO_2/HCN 生成率を使って、我々はそれが 20% の比で H^{13}CN 線の強さに影響を及ぼすと見積もることができる。

(4) より批判的に、 HC^{15}N スペクトルは装置起源でありそうである 2 (統計雑音に関連した変動より上の 10 の因数) 倍の走査強度変化を示す。これらの訂正を考慮に入れて、我々は $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 94 \pm 8$ と $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 205 \pm 70$ を推論する。しかしながら、Jewitt ほかの (1997) 値は 100 ± 12 と 323 ± 46 である。我々の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ の決定の大きな不確実性は、 HC^{15}N サイズの分散を反映する。

我々は、ヘールボップ彗星の HCN の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比がかなり不確かであるが、CN で計られる値と一致していると結論する。

5 推測される結果など

HCN と CN の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 値は、89 である。これは、前の計測の地球上での値と、彗星 (e.g., Bockele e-Morvan et al. 2005) とで一致する。

17P/ホームズ彗星で HCN と CN で測定される $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比は、地球の大気の数値と比較して 2 つの ^{15}N エンハンスメントの要因と一致し、 141 ± 29 で集まる 1ダースの彗星の CN で測定される $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比と一致する。(Arpigny et al. 2003; Hutsemékers et al. 2005; Manfroid et al. 2005; Jehin et al. 2004). HCN の間の相違と前のヘールボップ彗星に見られる CN 同位体比は、おそらくは、塵の粒子中

に存在する難燃性有機物は、 ^{15}N リッチの熱的な分解によるものであるから、彗星の大気における HCN の光分解以外の CN を生産するというメカニズムの提案に至った。CN ジェットの存在、CN 放射分布により、HCN の光学的解離により、この解釈は支持され、CN/HCN のいくつかの彗星における生成率の割合は 1 以上である (Fray et al. 2005)。しかし、この問いかけは、太陽中心の距離においてヘールボップ彗星で観察される等しく低い $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 値を説明する方法に関して提起され、主に HCN の光解離によりラジカルな CN ができると期待されたものである (Manfroid et al. 2005; Rauer et al. 2003)。

ヘールボップのデータ (それは HCN の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比が CN 値値を含むことを示す) の我々の再解析は、この問題を解決する。また、HCN と CN で見られる同程度の同位体比は、ガスへの塵生成率の大きな違いを示している彗星において、より良い説明を $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比の均一な値として提供する。我々の同位体測定は、彗星の大気中の CN の主要な起源である HCN と同等である。ヘールボップ彗星では、2 種の生成率はほぼ等しい (Rauer et al. 2003; Fray et al. 2005)。17P ホームズのコマの複雑で変化のある構造は、のちのバーストにより HCN と CN 生成率の比較をこの彗星にとって難しくした。しかし、Dello Russo ほかは (2008)、狭帯域光度測定 (Schleicher 2007) で測定される赤外線範囲と OH/CN 多量比から測定される多量の HCN/ H_2O と主に HCN 光分解によって生産されている CN と良く一致している点に注意している。それでも、他の彗星において、我々はそれを除外できない。他の彗星では、CN は同じ低い $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 同位体比を共有している他の主な源 (ちりまたは気相のガス等) を持っている。そして、それは ^{15}N 過多にすることがおそらく彗星の中の CN を含んだ合成物の一般的な特性であることを意味する。

ヘールボップ彗星と 17P/ホームズは異なるダイナミックな種族である。そして、前者がオールト雲由来であり、後者は、トランスネプチューンの散ら

ばったディスク由来である。CN の異常な窒素の同位体比は、これらの 2 つのダイナミックな多数集団からいくつかの彗星で観察される。それゆえに、たぶんこれらの 2 つの貯留型由来の彗星は、HCN で類似した異常な N 同位体比を示す。

彗星の HCN における ^{15}N の過剰性については、(地球大気の数と比較して $\cdot^{15}\text{N} \sim 1000$) と CN の娘核種生成物 (daughter product) は、彗星大気中の同位体分離物からは生じない。それは、惑星間塵 (IDPs; Floss et al. 2006)、および、炭素質の隕石 (Busemann et al. 2006) で測定された最大の過多と同等である。高い $\cdot^{15}\text{N}$ 値は、81P/Wild2 彗星から Star dust mission によって集められる塵のサブミクロンサイズの大きさでも存在する (McKeegan et al. 2006)。IDP と隕石において、 ^{15}N の豊富な窒素は不揮発性の高分子有機材料によって運ばれて、通常、恒星間の化学 (的な材料) の残りであると考えられている、しかし、高い過剰な ^{15}N の元素合成源は太陽系誕生以前の隕石の粒子の機構であると考えられている (e.g., Zinner 1998)。これらの複雑な有機物の形成は、おそらく、太陽系誕生以前の雲の中で、または、後の段階において、太陽の星間雲の冷えた部分で単純な氷の UV または宇宙線の放射によりできた。ここで報告される過多は太陽系外の星雲の氷の形成した揮発性物質で ^{15}N という例外の存在を最初の証拠を示した。また、おそらく最初の難燃性有機物の基質を示した。

彗星の HCN と H_2O 氷は、宇宙空間の D/H 値に関して、重水素での強い強化を示し (Ehrenfreund et al. 2005; Bockele e-Morvan et al. 2005)、そしてこれらの強化は、太陽系形成の早い段階に低温の時、または、(太陽系形成時) の分子雲の中で起こったイオン-分子、そして、ガス-粒子相互作用を反映していると考えられる。HCN の ^{15}N 過多の解釈 (中心的な窒素の貯蔵における太陽系形成前の値に関して 3 倍であるが (Fouchet et al. 2004; Meibom et al. 2007)、それが重水素ほど (大きな) 魅力でない。なぜならば、これらには、窒素についてすこしも証拠となるものがない。というのも、

まだ窒素の同位体として、識別できる証拠が恒星間の媒体物質の中にほとんどない (Ikeda et al. 2002) からだ。HCN の、主な窒素貯蔵する N_2 を含んだ相互作用すると考えられた ^{15}N 強化が控え目であるからである (Terzieva & Herbst 2000)。Rodgers と Charnley (2004, 2008) は、 N_2 が原子窒素に変わるならば、非常に分別された NH_3 氷が恒星間のまたは太陽系形成前の材料でできること示した。まだ彗星での HCN の同位体の例外を説明するための化学的構造が提案されなければならないが、この仕組みは、 NH_3 から総合され、最初の難燃性有機物での高い ^{15}N であるがゆえに魅力的である。変容性のある仕組みとして、太陽系の雲の中での元素合成の起源と光化学物質の自己遮蔽や、隕石による酸素同位元素の例外を説明する場合の仕組みと類似している (Clayton 2002a, 2002b)。(そのような) 仕組みにかかわらず、原始の太陽における HCN は、太陽系の進化後の段階で、星雲上でできた N_2 と決して同位元素的に等しいとはいえないと考えられる。

(翻訳担当: 宮地晃平)