

近赤外線波長領域における彗星氷物質の 高分散分光サーベイ

平成 27 年 4 月 23 日受付

河 北 秀 世 *1
新 中 善 晴 *2

要 旨

本稿では、彗星氷中の窒素を含む分子について、 ^{15}N 濃集を調べた。彗星アンモニアにおける $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} \sim 150$ であることが我々の観測から明らかになりつつあり、この値は過去の研究で得られている CN あるいは HCN における値と近い。この結果から、彗星氷中のアンモニアが固体表面反応によって生成された可能性が高く、また HCN とアンモニアが共に中性窒素原子を起点とする化学反応パスによって形成された可能性を議論した。

キーワード：彗星，分子生成， ^{15}N 濃集，星間化学，太陽系起源

1. はじめに

彗星は太陽系の始原天体であると言われる。その理由は、太陽系が 46 億年前に誕生した母体である「分子雲」と呼ばれる希薄なガス塊の情報を、彗星氷がとどめているためである。太陽系の誕生は、分子雲内で密度が高い「分子雲コア」部分が重力的に収縮し、原始星および原始惑星系円盤を形成するところから始まる。その際、分子雲内には大量のガスおよび固体微粒子が存在している。固体微粒子は、主にケイ酸塩や炭素質のダストの周りに H_2O を主成分とする氷が付着したものと考えられている。太陽系の形成に伴い、これらのガスおよび固体微粒子が集積するのであるが、中心にあった太陽については固体微粒子でさえも完全にガス化してしまうほどの高温であるのに対し、原始惑星系円盤の外縁部で形成された彗星の核は、固体微粒子が集積して誕生した。そのため、分子雲中のガスの主成分である H_2 や揮発性の高い希ガスなどは彗星核にはほとんど含まれていない。一般に、分子雲の温度は 10K から 100K 程度とされる（大質量星形成領域などで周囲に既に恒星が誕生している場合には、ガスの温度も比較的高くなる）。過去の彗星氷の成分（比較的揮発性の高い CO 分子の組成比や、 $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ 比など分子における重水素濃集の程度、 H_2O などの原子核スピン異性体比など）についての研究から、従来は彗星分子の形成環境は約 30K 程度の温度だったと考えられてきた。本研究では、特に窒素同位体の存在比 ($^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$) に着目した観測的研究を行った。

*1 京都産業大学理学部

*2 京都産業大学理学研究科

過去には、可視光波長域で観測される CN 分子について、彗星における $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比がサーベイされた例がある。その値は、太陽系組成比である 441 に対して約 150 という値になっており、 ^{15}N 濃集のプロセスが存在することが明らかになっている。CN 分子は一般には HCN 分子が彗星核から昇華したのちに彗星コマ中で太陽紫外線によって光解離したものと考えられている。HCN そのものについても観測例はわずかに存在しており、基本的には CN の結果を裏付けている。一方、彗星氷中にある「窒素を含む分子」の中で最も豊富と考えられるアンモニア分子 (NH_3 分子) については、同様の研究はあまり進展していなかった。ごく最近になって、我々を含む研究グループで NH_2 を手がかりとした研究が進展しつつある。その結果から、星間空間におけるアンモニア分子の ^{15}N 濃集プロセスについて議論することができる。これは、化学反応の場としての星間空間の物理環境に大きな制約を与えることに繋がる。本稿では、 NH_2 分子における $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ のサーベイについて、その進捗を報告したい。

2. 彗星アンモニアの窒素同位体比サーベイ (中間報告)

本研究では、アンモニア分子の輝線強度から、その ^{15}N 濃集の程度を探ることを当初の目的とした。そこで、アンモニア分子輝線は振動遷移が波長 $3\ \mu\text{m}$ 付近に存在していることから、振動バンドシステムを利用して同位体比を決定する方法について検討した。しかし、近赤外線波長域では十分な SN 比を得ることが困難であると判断し、可視光線から近赤外線波長域に存在する NH_2 のラインを利用することとした。 NH_2 はアンモニアが彗星コマ中で光解離されて生成されるラジカルであり、アンモニア分子の proxy として他の研究でも用いられる事が多い。

NH_2 ラジカルの $^{14}\text{NH}_2/^{15}\text{NH}_2$ 比については、ごく最近になって我々の研究グループとヨーロッパの研究グループが、それぞれ成果を出し始めたところである。ヨーロッパの研究グループでは、過去 10 年間にわたって欧州南天文台 ESO の 8m 望遠鏡群 VLT に搭載された高分散分光器 UVES による分光サーベイ結果から、特に SN の高い 12 個の彗星のデータを全て平均化することで SN 比を最大限に高め、そのスペクトル中に $^{15}\text{NH}_2$ の輝線を得ている。その測定結果から、 $^{14}\text{NH}_2/^{15}\text{NH}_2 \sim 130$ となっている (Rousselot et al. 2014)。また、我々は単独彗星について上記の測定に成功しており、 $^{14}\text{NH}_2/^{15}\text{NH}_2 \sim 140$ となっている (Shinnaka et al. 2014)。基本的にこれらの結果は誤差範囲では一致しており、彗星アンモニア分子においても ^{15}N の濃集が進んでいることが明らかとなった。そこで更に多くの彗星についても同様の観測を進め、観測精度の向上と、より統計的な議論にむけて取り組んでいる。今回、さらに 2 つの彗星について結果を得たので、それを含めて報告する。

我々のグループでは、2013 年の C/2012 S1 (ISON) 彗星、C/2013 R1 (Lovejoy) 彗星、そして 2015 年の C/2014 Q2 (Lovejoy) 彗星の観測結果から、それぞれの彗星について、 $^{14}\text{NH}_2/^{15}\text{NH}_2$ を得た (そのうち、ISON 彗星については既に Shinnaka et al. (2014) にて報告済み)。また、暫定的ながら、C/2012 F6 (Lemmon) 彗星の観測結果がヨーロッパの研究グループによって報告されている。これらをグラフにまとめたものが図 1 である。

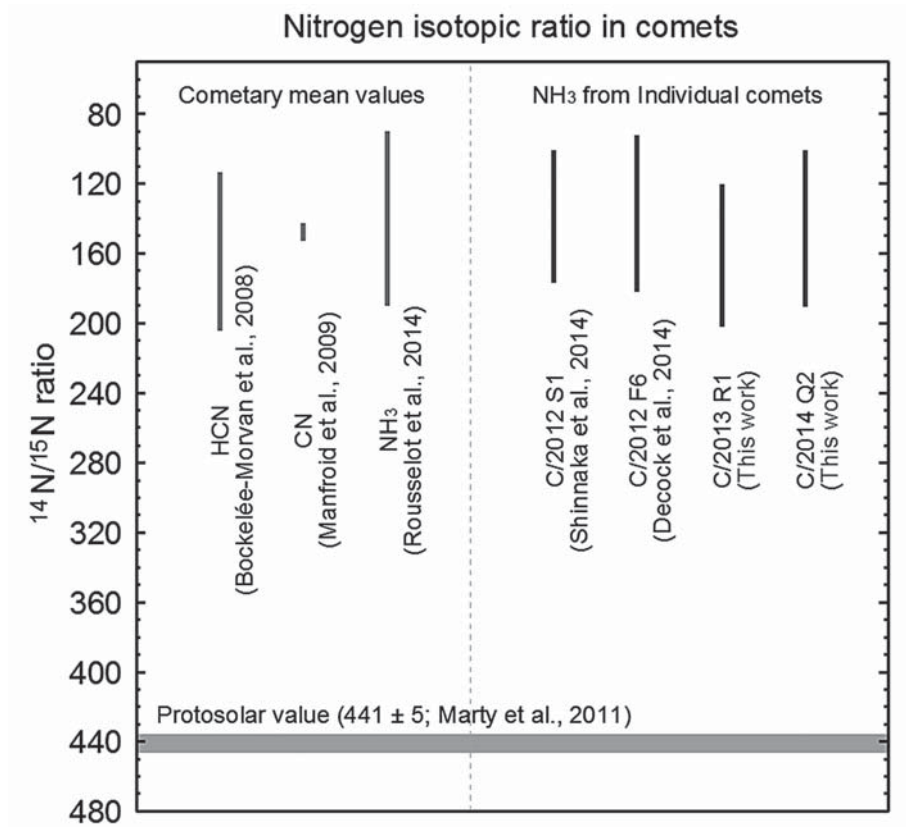


図1：彗星における窒素同位体比

3. 議論

データ処理および解析方法については、基本的に Shinnaka et al. (2014) と同じである。決定誤差は主に測定そのものに起因するランダム誤差と、測定原理（および用いた仮定）に起因すると思われる系統誤差によるが、特に後者が~25%にもおよぶと考えている (Shinnaka et al. 2014)。この系統誤差は、 $^{14}\text{NH}_2$ と $^{15}\text{NH}_2$ と同じ光解離率、同じ遷移確率を持つとした仮定によるかと考えており、SNの高い Rousselot らの12個の彗星の平均スペクトルでさえ個別のラインで $^{14}\text{NH}_2/^{15}\text{NH}_2$ に~25%程度のばらつきが見られることから、Shinnaka et al. (2014) では系統誤差を~25%として考慮している。しかし、一般にはこの系統誤差は測定値に基づくランダム誤差よりも大きく、図1の結果からも系統誤差の見積もりが過剰である可能性がある（すなわち、図中のエラー・バーほどには代表値はばらついていない）。今後、各遷移の遷移確率についての実験室における分子科学的な研究が必要である。

少なくとも図1からは、①彗星アンモニアが ^{15}N に濃集していること、また、② $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比はCNおよびHCNと同程度であること、が分かる。現在の星間化学の知識からは、窒素原子のように比較的重い元素について、 ^{15}N を特定の分子に濃集させるメカニズムは十分には明らかではない。たとえ

ば Wirström et al. (2012) では、固相の HCN については観測されている程度の ^{15}N 濃集を実現できても、固相のアンモニアを観測されたレベルまで濃集することはできない。これはアンモニア分子の生成パスが、HCN とは異なっている（ニトリルとアミノで異なっている）ことに起因している。HCN はおもに窒素原子からの生成パスとなっているが、アンモニアは窒素分子 (N_2) を起点として考えられている。

この問題を解決するためのアイデアとして、我々は塵表面での水素原子付加反応によるアンモニア分子生成を提案する。もしも HCN のようなニトリルが ^{15}N に富んでいるならば、その原因は N_2 分子の選択的光解離にある可能性がある。たとえば、 $^{14}\text{N}^{14}\text{N}$ に比べて $^{15}\text{N}^{14}\text{N}$ は存在度が 2 桁も低い。これは星間空間からの紫外線など（特に大質量星形成領域では分子雲環境の紫外線輻射場が強い傾向にあると考えられる）が N_2 分子そのものの自己遮蔽効果によって阻害されると考える時、 $^{14}\text{N}^{14}\text{N}$ に比べて $^{15}\text{N}^{14}\text{N}$ はより内側まで解離されるということを意味する。つまり、

1. 領域 I : 分子雲コアの外部で N_2 分子が完全に解離されている
2. 領域 II : 分子雲コアの比較的内部、 $^{14}\text{N}^{14}\text{N}$ は自己遮蔽効果によって外部の紫外線から守られて分子状であるが、 $^{15}\text{N}^{14}\text{N}$ は紫外線吸収が光学的に薄く ^{15}N と ^{14}N に解離されている領域
3. 領域 III : 分子雲コアの内部で、 $^{14}\text{N}^{14}\text{N}$ も $^{15}\text{N}^{14}\text{N}$ も共に分子状態

というように分子雲コアを領域別に分けると、領域 II では原子状のガスとして ^{15}N が濃集していることになる。このような比較的濃い状態となった分子雲コアにおいて、様々な化学反応が進行し、上記の領域ごとに比較的短時間で ^{15}N の濃集プロセスが進む可能性がある。分子雲コアの寿命は 10^5 年程度としても（十分に観測的に理解されているわけではない、また、分子雲そのものの寿命は $\sim 10^6 \sim 10^7$ 年と考えられる）、十分に検討の余地があろう。また、この仮説では、領域ごとに窒素同位体の存在比が異なることが予想される。つまり、領域 II でのみ ^{15}N の濃集が進み、それ以外の領域ではあまり顕著な濃集が見られないということである。分子雲コアからの物質降着は、基本的に初期の構造を保って収縮する。すなわち、より内側の物質はより早く中心星や原始惑星系円盤の内側領域に降着し、分子雲コア外側の物質は後から降着して原始惑星系円盤の外側に降着する (Visser et al. 2009, Fig. 7)。このことから、領域 II で降着した氷を含む固体微粒子が彗星形成領域（原始太陽から $\sim 30\text{AU}$ 付近）に大きな影響を与えた可能性がある（領域 I は温度が高くガス密度も低いため、特に揮発性の高い分子については、氷として存在する可能性が低いと考えられる）。今後、簡単な見積もりによって上記シナリオの可能性を検討することが可能であろう。

このアイデアに基づけば、塵表面反応によってアンモニアが作られる際に ^{15}N の濃集が進み、氷中のアンモニアについて $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比が高く、また HCN と同程度の窒素同位体比になることが説明できると考えられる。今回、中間報告を行った観測結果は、彗星氷中のアンモニアの大部分が固体表面反応によって形成された可能性を示唆している。

4. まとめ

本稿では、彗星氷中の窒素を含む分子の ^{15}N 濃集から太陽系の起源となる分子雲環境について探る事を目的に、アンモニア分子の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ を NH_2 ラジカルの観測から求めた。その結果は、 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} \sim 150$ であり、ほぼ CN (あるいは HCN) における値と同程度であることが明らかになりつつある。現在のサンプル数では十分な議論はまだであるが、個々の彗星におけるばらつきは少ないようである。この点でも CN (あるいは HCN) との類似性が高い。これは彗星氷の起源が極めて一様な環境にあることを意味しており、彗星形成環境への物質供給が特定の物理環境からなされたことを意味している。今回、分子雲コアの比較的暖かい領域で彗星氷が形成されたというシナリオを提示した。今後、星間化学の発展にともない、10K 程度の低温度環境でも ^{15}N 濃集が可能であると分かれば、更にシナリオの変更が必要になるだろう。

参考文献

- (1) Rousselot et al. (2014), ApJ Lett., 780, 17.
- (2) Shinnaka et al. (2014), ApJ Lett., 782, 16.
- (3) Wirström et al. (2012), ApJ Lett., 757, 11.
- (4) Visser et al. (2009), A&A, 495, 881.

High-resolution Spectroscopic Survey of Cometary Molecules in Near-infrared Wavelength Region

Hideyo KAWAKITA
Yoshiharu SHINNAKA

Abstract

In this study we discuss about ^{15}N -fractionation in cometary N-bearing molecules like NH_3 and HCN . Our observations have revealed that $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ ratio ~ 150 for cometary NH_2 (i.e., for ammonia frozen in cometary nuclei), which is similar to a typical value for CN and HCN . The ^{15}N -fractionation might occur in the stage of molecular cloud core via grain-surface chemistry from atomic nitrogen.

Keywords : Comets, Molecular formation, Fractionation of ^{15}N , Interstellar chemistry, Origin of solar system