

近赤外線波長域における彗星氷物質の 高分散分光サーベイ

平成 26 年 5 月 1 日受付

河 北 秀 世*

要 旨

本研究では C/2013 R1 (Lovejoy) 彗星の高分散分光観測を行い、可視光線および近赤外線波長域に見られる CN 分子の輝線スペクトルについて、その発光モデルを構築し、炭素および窒素の同位体存在比を決定するための基礎的研究を行った。

キーワード：彗星, C/2013 R1 (Lovejoy), CN ラジカル, 太陽系, 分子雲

1. はじめに

太陽系は約 46 億年前に分子雲と呼ばれる希薄なガス塊から誕生したと考えられる。通常、このガス雲は太陽質量の何十倍にも達する質量を持っており、単一の分子雲から多数の恒星が誕生する。太陽系の起源となった分子雲の性質については、未だ十分には理解されていない。以前は、太陽のような小質量星は暗黒分子雲と呼ばれる絶対温度 10K 程度の分子雲（例：牡牛座分子雲など）で形成されるとされてきた。しかし、最近ではオリオン座分子雲に代表されるような比較的大質量星が形成されるような領域であり、温度が 30K 程度の暖かい分子雲でも小質量星が形成されることが分かっており、太陽系の起源は十分には理解されていない。

太陽系は既に誕生から 46 億年が経過しており、その誕生時の情報はきわめて限られた形でしか保持されていない。例えば、地球などの惑星については、既に様々な化学変化や放射性物質の崩壊熱を起源とする熱的進化、更には水質変成などによって構造的にも組成的にも変化が生じてしまっており、46 億年前の太陽系誕生時の情報はほとんど失われている。しかし、小惑星や彗星といった太陽系小天体については、質量が小さく、放射性物質による構造的・組成的変化もほとんど無く、太陽系形成時の様々な情報が現在でも保持されていると考えられる。こうした始原的天体を手がかりとして 46 億年前の太陽系誕生時の様子を探るという研究手法が惑星科学の一つの方向性である。本研究では、太陽系始原天体である氷小天体「彗星」を手がかりとして太陽系形成に迫ることを主な目的としている。

* 京都産業大学理学部

2. 太陽系始原天体としての彗星

彗星は揮発性の氷微粒子と難揮発性の固体微粒子からなる小天体である。サイズはキロメートルから数十キロメートル程度であるが、太陽を巡る軌道上の位置によって揮発性氷が昇華し、それにとまって固体微粒子が放出される。この固体核（彗星核）から放出されたガスや固体微粒子は「コマ」と呼ばれる拡散状大気を形成する。コマ中の分子や原子は太陽光を受けて高いエネルギー状態に励起され、その後、そのエネルギー状態に特有の寿命に応じて低いエネルギー状態へと戻る（自然放出）。その際に放出される光子が彗星コマの発光として観測される。ダスト粒子によっても太陽光が散乱されるが、これについては本研究では特に取り扱わない。このようにして、彗星核を構成する氷物質の成分比を得ることが可能となる。氷物質の成分比は、彗星氷物質が形成された環境を反映しており、その温度やガス密度などを探る手がかりとなる。

彗星氷物質の分子組成比は重要な指標となるが、後天的な進化の影響も考慮しなくてはならない。例えば揮発性の高い一酸化炭素 CO（昇華温度は約 25K）などは、彗星核が何度も太陽の近くを回帰するに従って、次第に選択的に失われる可能性がある。そのため、軌道周期が短い彗星については、CO が欠乏する可能性が指摘されている。一方、こうした影響を受けにくいのが、特定の分子における同位体比である。

例えば彗星核の揮発性物質の主成分は H_2O である。水素原子 H と酸素原子 O からなる水分子において、水素原子の同位体である重水素 D が含まれる「重水」HDO の存在比率は、これらの分子が生成された分子雲での温度環境を反映すると考えられている。一般的に言えば、より重い同位体を含むことにより、振動の零点エネルギーが低下し、そのため、より重い同位体を含む分子のほうがわずかながら生成されやすい。もちろん、逆反応との平衡によって生成物の存在比率が決定される。例えば H_2O と HDO の場合、ガス温度が 30K 程度以下であれば、H 原子と D 原子の存在比率よりも高い比率で D 原子が分子として固定されるという特徴がある。こうした重水素の濃集を観測的に決定することにより、化学反応がおこった環境を探ることができる。重水素と水素だけでなく、窒素原子の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比が、近年、着目されている (Shinnaka et al. 2014; Rousselot et al. 2014; Jehin et al. 2009; Manfroid et al. 2009)。近年、観測的研究の進展により、彗星において観測される $\text{H}_2\text{O}/\text{HDO}$ 比は 30K 程度の温度であれば説明可能であると考えられるようになってきた。しかし、彗星コマ中で観測される CN ラジカルにおける窒素同位体比が多くの彗星について明らかになってくるにつれ、窒素同位体比を説明するには 10K 以下の温度環境が必要であると考えられるようになってきた。この矛盾は未だ解決されていない問題である (Mumma & Charnley 2011)。

また、昨年、我々のグループは神山天文台において新星爆発の可視光低分散分光観測から、新星爆発によって放出される CN 分子において、 ^{15}N が ^{14}N と同程度に生成される事を発見した (Nagashina et al. 2014)。太陽系の平均的な窒素同位体比は、 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} \sim 450$ 程度であり、彗星で観測される値である ~ 150 とは大きく異なっている。何かのプロセスがこの濃集を生じさせていると考えられるが、その理解は進んでいない。

本研究では、更に多くのサンプルについて CN 分子の炭素および窒素同位体を観測的に明らかにすることを目的としている。そのために、神山天文台において開発中の近赤外線高分散分光器 WINERED を用いて、波長 1.1 ミクロンおよび 0.9 ミクロン付近にみられる CN 分子の電子遷移バンドを観測し、同位体比のサーベイを行うことが最終目的である。しかし、観測結果から同位体比を得るには、CN 分子のモデル化が必要であり、また、そのための基礎データとして波長 388nm 付近の Violet-system バンドの観測を実施し、波長 1 ミクロン付近にみられる Red-system バンドとあわせて両者を説明可能な発光モデルを構築することが急務である。

3. 観測結果

今回、C/2013 R1 (Lovejoy) 彗星を観測した。C/2013 R1 (Lovejoy) 彗星の高分散分光観測は可視光線および近赤外線波長域で実施し、CN 分子の Violet- および Red-system バンドを観測している。可視光線の観測にはハワイ等に設置された国立天文台の口径 8m 望遠鏡 Subaru Telescope を用いた。観測装置は可視光高分散分光器 HDS である。また、神山天文台において C/2013 R1 (Lovejoy) 彗星の近赤外線高分散分光観測を、WINERED 分光器を用いて実施している。それぞれが、CN 分子の Violet- および Red-system バンドをカバーしている。最終的には近赤外線波長域での観測メリットを生かし、Red-system バンドのみから炭素および窒素同位体比を得ることが目的であるが、そのために必要な CN 分子発光モデルの構築という観点から、両方のバンドを再現することを第一ステップとしている。

可視光線の観測は 2013 年 11 月 15 日 (世界時) に実施した。観測される彗星スペクトルは、ガスによる発光とダストによる太陽反射光を含んでいるため、得られた高分散スペクトルからダストによる太陽散乱光成分を除去する必要がある。図 1 に可視光線波長域で得られた CN 分子の輝線スペクトルを示した。CN 分子は異核二原子分子であり、電子遷移には振動および回転のエネルギー構造が現れる。図 1 では主に $\Delta v = 0$ のバンドについての回転構造が顕著に見られているが、通常、実験室で得られるような滑らかな包絡線を持たない。これは、CN 分子の励起エネルギー源となっている太陽スペクトルが、この波長域において多数の金属吸収線 (フラウンホーファー線) を有しており、各遷移の波長における励起の遷移確率がフラウンホーファー線の影響を受けて小さくなる例があるためである。

近赤外線波長域については、1 ミクロン帯に見られる CN 分子の Red-system バンドの輝線を、神山天文台の 1.3m 望遠鏡に装着した近赤外線高分散分光器 WINERED を用いて観測している。現在、より精度の高いデータ処理を実現するための取り組みを行っており、今回は、主に上記の可視光線波長域のデータについて議論する。図 2 には観測データと CN 分子 Red-band のモデルスペクトルとの比較を示した。ここでは地球大気中の OH 分子による強い発光も観測されている。この波長域では、太陽スペクトル中のフラウンホーファー線の数は紫外線領域ほどには多くなく、そのため、単純に Boltzmann 分布を過程した単純なモデル計算によって (後述) CN 分子の発光が再現できているように見える。しかし、炭素および窒素の同位体比を得るには、詳細な発光モデルの構築が必須となる。

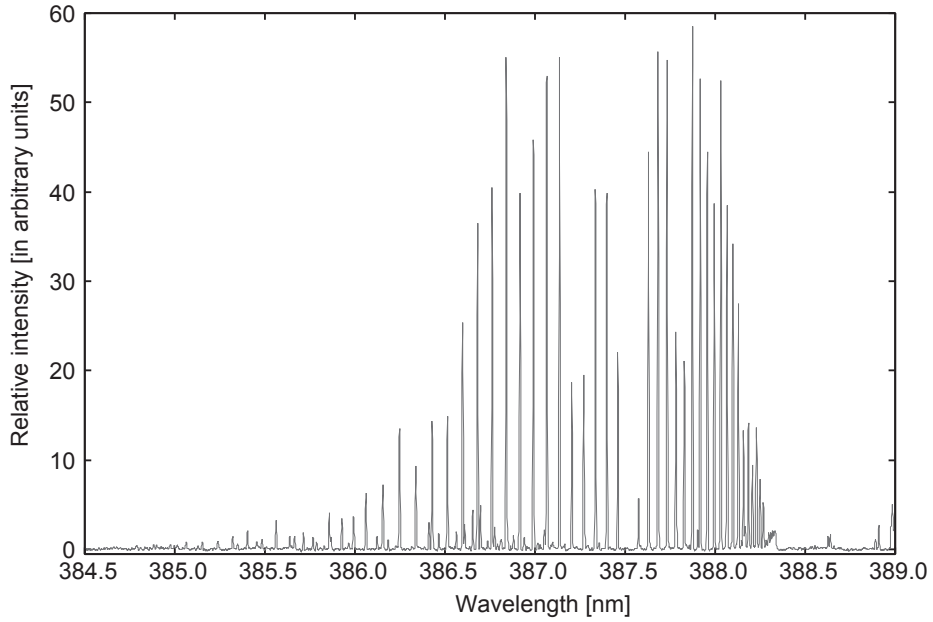


図1：Subaru Telescopeで観測したC/2013 R1 (Lovejoy) 彗星におけるCN分子のViolet-systemバンド発光スペクトル（太陽光のダスト散乱成分は差引き済）。

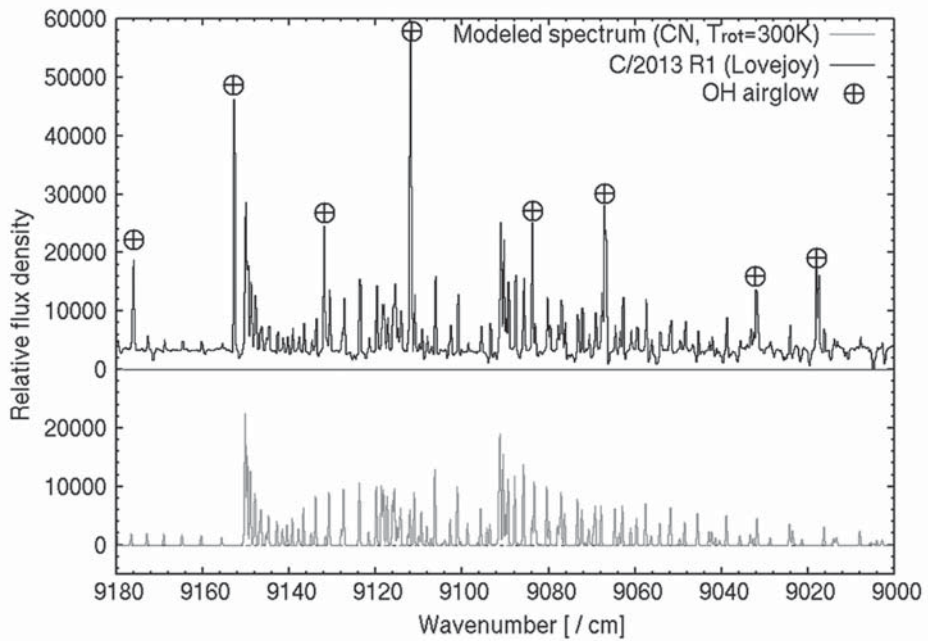


図2：神山天文台1.3m 荒木望遠鏡と近赤外線高分散分光器WINEREDを用いて観測したC/2013 R1 (Lovejoy) 彗星におけるCN分子のRed-systemバンド。大気中のOHによる輝線が目立つ。

4. CN 分子発光モデル

本研究では、CN 分子発光を以下のようにしてモデル化している。CN 分子の各種遷移（電子、振動、回転遷移）の波長については、Brooke et al. (2014) による実験室データと *ab initio* 計算を組み合わせた最新の結果を利用している。また、各遷移の遷移確率を表す Einstein A 係数についても、同論文から引用した。このデータをもとに CN 分子の発光スペクトルを得るには、各エネルギー準位の滞在数を決定する必要がある。あるエネルギー準位（エネルギーの値を E とする）に存在する分子の割合を $n(E)$ とすると、当該準位を上位準位とする遷移について（Einstein A 係数を A と書けば）、単位時間あたりに放出される光子の数は、 $n(E) \times A$ となる。滞在数分布として、例えば単純な Boltzmann 分布を仮定すると、図 2 のモデルスペクトルが得られる。およそこれで観測を再現できているわけであるが、細かい部分での不一致も見られる。これは、CN 分子を励起するためのエネルギー源が太陽光であり、そのスペクトル中に多くの吸収線が存在していることに起因する。そこで、各分子の励起については、太陽光スペクトルを用いた精密なモデル化が必要となる。

本研究では、二つのモデル化を試みた。1 つ目は「蛍光平衡 (fluorescence equilibrium)」モデルである。これは、太陽光励起による遷移（励起および脱励起）と、自然放射による遷移が統計的バランスを保って平衡状態になっているというモデルである。これを解くには、考慮する数千もの状態を含む連立微分方程式を解くことになるが、実際には定常状態という仮定から連立代数方程式として簡単化される。

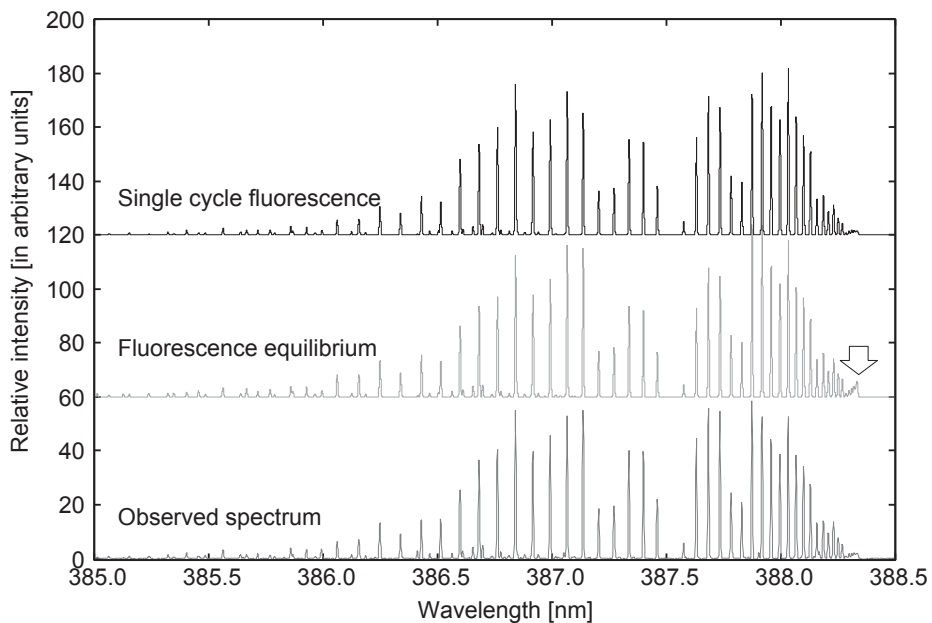


図 3 : CN 分子の Violet-system バンド発光スペクトルについてのモデルフィット結果。

二つ目のモデルは、電子振動基底状態について Boltzmann 分布を仮定し、上位の電子・振動励起状態については、基底状態との遷移のバランスが実現されているという仮定をしたものである。これは、高分散分光観測において彗星核近傍のガス密度の高い領域を観測しているために、分子間衝突が顕著となって（衝突による回転遷移が卓越し）基底状態については Boltzmann 分布が実現されるというものである。通常、彗星コマの力学的温度は数百 K 以下であるので、衝突励起によって振動遷移や電子遷移を起こすことはできない。そのため、基底状態のみ Boltzmann 分布が実現され、励起状態については太陽光による励起・脱励起と自然放射による脱励起がバランスするという「single-fluorescence」モデルを採用した。この場合には温度パラメータをフリーパラメータとしてモデルと観測の一致を試みることになる。図3にこれらのモデル化の結果と、観測結果との比較を示した。いずれのモデルについても、太陽光スペクトル中のフラウンホーファー線が原因となる輝線パターン再現については、ほぼ達成されている。二つのモデルにおける顕著な違いは、高い回転エネルギーを持つ準位からの輝線であり、例えば図3において矢印で示した部分など（高い回転エネルギー準位からの輝線の集合となっている部分）が蛍光平衡モデルでは強くなりすぎている。そのため、今回の観測については single-fluorescence モデルによるフィッティングが現実的であると判断した。

5. 今後の課題

図4に、今回のモデルを更に同位体に適用した場合を考慮して行ったフィッティングの結果を示し

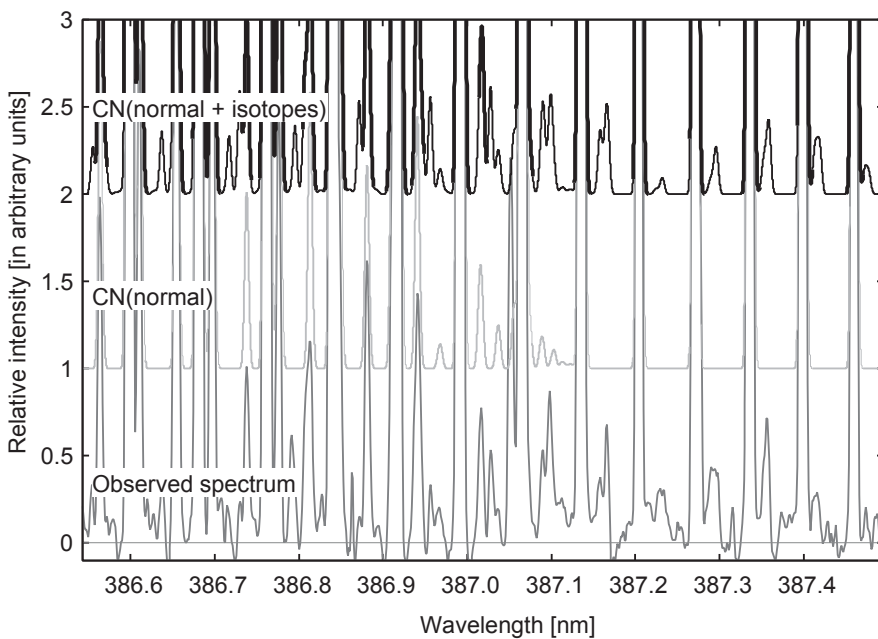


図4：CN分子の同位体を含めた場合のモデルフィット結果。同位体比として $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=89$, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}=150$ を仮定している。

た。同位体については、遷移確率はノーマルな CN と同じと仮定し、遷移波長のみ同位体シフトすると仮定している。図 4 では、典型的な同位体比として $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=89$, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}\sim 150$ を適用した。同位体による輝線の再現にもほぼ成功していると考えており、今後、モデルを用いた更に詳細なフィッティングと同位体比の決定をすすめ、更に近赤外線波長域での Red-system バンドのフィッティングを行う予定にしている。しかし、Red-system バンドについては輝線構造が複雑である上、地球大気の OH 輝線が多く混入していることから、地球大気中の各種分子による発光をまずサーベイし、その後、彗星の輝線サーベイに進む必要があるということが分かった。また、波長 3 ミクロン帯のデータも Keck 望遠鏡で得られており、HCN 分子との関連についても今後、研究を進めてゆく予定である。

参考文献

1. Brooke et al. (2014), *Astrophysical Journal Supplement*, 210, 23.
2. Jehin et al. (2009), *Earth, Moon & Planets*, 105, 167.
3. Manfroid et al. (2009), *Astronomy & Astrophysics*, 503, 613.
4. Mumma & Charnley (2011), *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 49, 471.
5. Rousselot et al. (2014), 780, 17.
6. Shinnaka et al. (2014), *Astrophysical Journal Letters*, 782, 16.

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

Hideyo KAWAKITA

Abstract

We performed high-resolution spectroscopic observations of comet C/2013 R1 (Lovejoy) in both optical and near-infrared wavelength regions. In the spectra we can identify prominent CN emission line features. In order to derive isotopic ratios of carbon and nitrogen in CN, we have developed emission models for CN in cometary coma.

Keywords : Comets, C/2013 R1 (Lovejoy), CN radical, Solar system, Molecular cloud