

「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」(2) 研究経過報告

平成 28 年 4 月 22 日受付

河 北 秀 世 *

要 旨

本稿では、彗星の近赤外線スペクトルにおいて $1\mu\text{m}$ 波長帯で主な輝線を生じる CN 分子を取り上げ、その発光モデルの詳細化について検討した結果を報告する。 $1\mu\text{m}$ 波長帯はこれまでにくわしいサーベイがされておらず、京都産業大学神山天文台に設置された世界屈指の感度を誇る近赤外線高分散分光器 WINERED を用いた未同定分子のサーベイが進行中である。そうした未同定分子 (CN 分子の同位体を含む) は微弱な輝線を有すると考えられるため、その検出には、主な輝線を発する CN 分子の同定と除去が必要となる。そこで、高精度な実験室分光データを元にした彗星 CN 分子輝線モデルの構築を行った。

キーワード：彗星、近赤外線、高分散分光、星間化学、太陽系起源

1. はじめに

太陽系の原材料物質の記憶をとどめる始原天体、特に氷物質を多量に含む彗星は、太陽系の起源・化学進化史と関連して重要な天体のひとつである。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から原始太陽系円盤に至る物質化学進化については、未だに議論が続いており、その議論を観測面で支えているのが彗星の観測データである。

現在、神山天文台では、世界屈指の感度を誇る近赤外線高分散分光器 WINERED を口径 1.3m 荒木望遠鏡に設置して運用しており、様々な天体の観測研究を推進している (図 1)。その一環として、彗星の $0.9\text{-}1.3\mu\text{m}$ 波長域における輝線サーベイを進めており、未同定の分子輝線が多数、発見されることが期待される。この WINERED 波長域には、CN ラジカルによる輝線が卓越している。CN ラジカルは強弱様々な輝線を発するため、これらの輝線を全て同定かつ差し引くことが、より微弱な輝線しか発しない微量成分 (たとえば CN ラジカルの同位体や、より複雑な分子) を検出するために必須となる。

図 2 に、典型的な観測条件 (太陽から 1 天文単位、太陽との相対速度 0km/s) における CN ラジカルの輝線発光強度を可視光線から WINERED 波長域について示した。この波長域では紫外～可視光付近に電子遷移 B-X に起因する電子・振動・回転遷移が多数見られる。一方で可視光から近赤外線

* 京都産業大学理学部

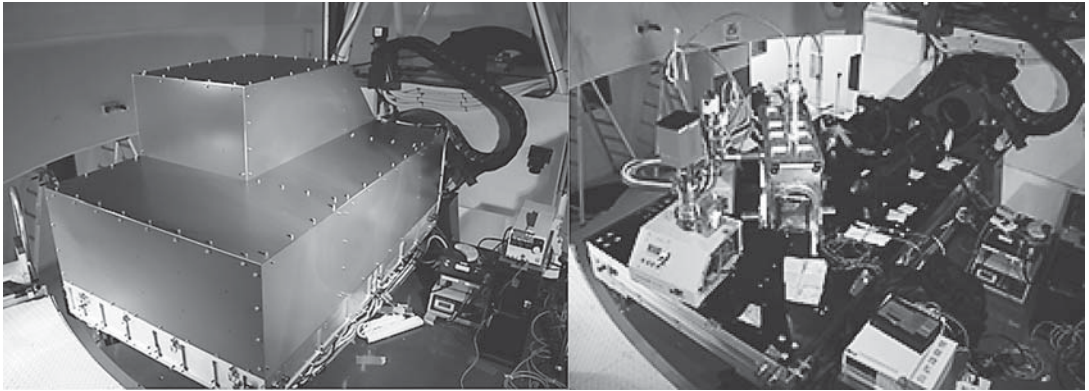


図1：近赤外線高分散分光器 WINERED（神山天文台）。観測波長域は 0.9-1.3 μm 。波長分解能 $R = 30,000$ の観測モードで現在運用中， $R=90,000$ の観測モードが 2016 年度中に定常運用に入る予定である。

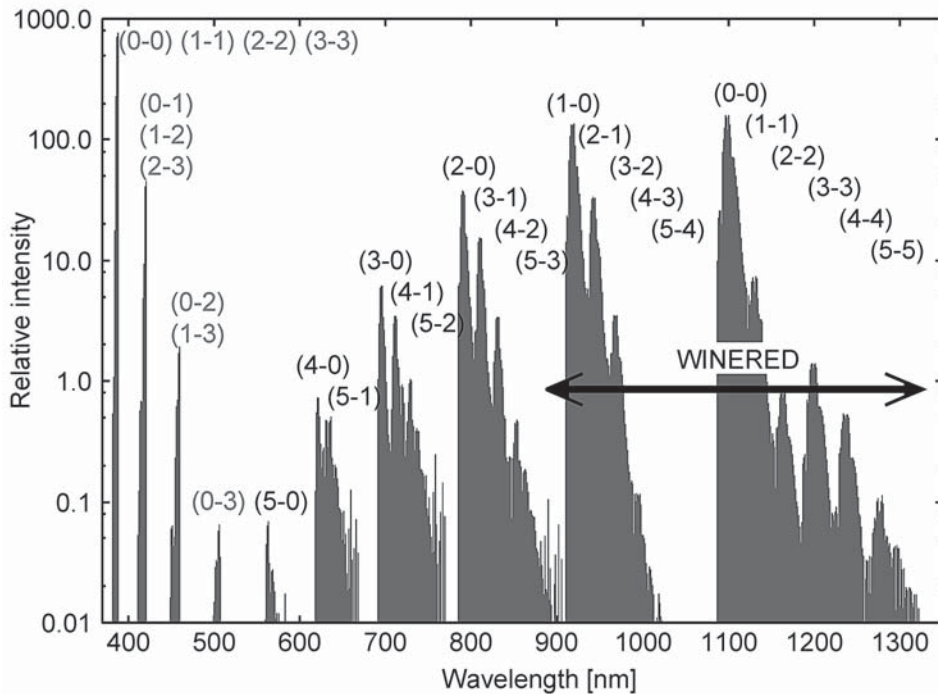


図2：彗星における CN ラジカルの輝線強度例

波長域にかけて，CN ラジカルの A-X 電子遷移に起因する電子・振動・回転遷移が顕著である。特に WINERED 波長域では，振動の量子数の変化 Δv が 0 あるいは +1 のバンド・シーケンスが強く，これらを弱い輝線に至まで同定することが研究上，必須となっている。

そこで本研究では、CN ラジカルの発光を微弱な輝線まで再現するための高精度輝線モデルの開発を行った。近年、実験室での CN ラジカルの分光データをもとにした理論的な研究が進んでおり (Brooke et al. 2014)、遷移確率の精密な決定が可能となってきた。本研究で開発する発光モデルは、こうした最近の知見を反映して、従来よりも精密な発光モデルを構築することを目指している。特に、A-X 電子遷移については、従来、高分散分光データに適応可能な発光モデルは構築されておらず、その開発は急務であると言える。

2. 発光モデルの詳細

これまでに発表されている CN ラジカルの発光モデルでは、それぞれ考慮しているエネルギー準位の数異なる上、遷移強度についても異なる値を採用している。特に本研究では、微弱な輝線を再現することを目的としているため、より多くのエネルギー準位を考慮する必要がある。表 1 に、本研究と専攻研究との比較を示している。本研究では、より大きな回転量子数まで採用し、より微弱な輝線を再現することを目指した。

表 1：本研究と過去の研究の比較 (エネルギー準位の数)

| 出典 | 振動準位 | 回転遷移 | 備考 |
|-------------------------|---|---------------|------------------------------|
| Zucconi & Festou (1985) | X: $v=0, 1, \dots, 5$ A: $v=0, 1, \dots, 3$ B: $v=0, 1$ | $J \leq 21.5$ | 場合によっては、より大きな J_{\max} を採用 |
| Kleine et al. (1994) | X: $v=0, 1, \dots, 5$ A: $v=0, 1, \dots, 4$ B: $v=0, 1, \dots, 3$ | $J \leq 30.5$ | |
| Manfroid et al. (2009) | X: $v=0, 1, \dots, 5$ A: $v=0, 1, \dots, 3$ B: $v=0, 1$ | $J \leq 21.5$ | Zucconi & Festou (1985) に準拠 |
| This work | X: $v=0, 1, \dots, 5$ A: $v=0, 1, \dots, 5$ B: $v=0, 1, \dots, 5$ | $J \leq 50.5$ | |

各遷移の波長および遷移確率については、放射遷移の場合、最近の研究 (Brooke et al. 2014) を参考にしている。同研究では、近年、得られた実験室データに理論的な成果を取り入れ、遷移確率を多くの遷移について求めたものである。本研究では、来補的に Brooke et al. (2014) で得られた回転遷移、振動・回転遷移、電子・振動・回転遷移の波長および遷移確率 (アインシュタイン A 係数) を用いた。電子遷移は、A-X および B-X 遷移を考慮し、B-A 間の遷移は弱いとして無視している。振動遷移は $\Delta v = \pm 1$ のみを考え (調和振動子近似)、純回転遷移は振動基底状態についてのみ考慮した (振動あるいは電子励起状態では、純回転遷移よりも速やかに振動遷移あるいは電子遷移が生じ

るため)。

また、遷移は放射遷移だけでなく、衝突遷移も考慮する必要がある。衝突遷移として、(1) 電子との衝突、(2) 中性分子との衝突、を考慮した。(3) プラス・イオンとの衝突については、電子衝突による遷移とくらべて十分に小さいとして無視している (Kleine et al. 1994)。

電子および中性分子との衝突では、ともに衝突パートナーである電子や中性分子の運動エネルギーが低く (力学的温度にして、たかだか 150K 程度)、そのためエネルギーの観点から電子遷移や振動遷移による励起は難しい。そこで、衝突遷移は電子振動基底状態についてのみ考慮することとした。

電子衝突遷移による遷移確率の計算は、Itikawa (1971) に基づき Born 近似を採用し、励起および脱励起の断面積から換算して求めた。Itikawa & Takayanagi (1969) では、実験で得られた遷移の断面積に比べて、Born 近似では ~10% ほど大きめの見積もりになっていることが指摘されている。そこで、ここでは断面積の見積もりに 0.9 倍という補正因子を採用した。また、Itikawa (1971) の Born 近似を採用した式では、衝突遷移の断面積は、該当するエネルギー準位間の電気双極子遷移の遷移モーメントの 2 乗に比例した形になっている。そこで電気双極子遷移の遷移モーメントを、前述の Brooke et al. (2014) より求めて計算に用いた。その結果、電子衝突遷移については $\Delta J=0, \pm 1$ の遷移を考慮している。電子温度についてはパラメータとなっているが、典型的な彗星コマ内の電子温度は彗星核から 1000km 程度離れた場所で約 50K である。

一方、中性分子との衝突では、衝突パートナーとして H_2O 分子を想定している。この場合の衝突遷移確率の計算は非常に複雑であり、適切な参考文献も存在しない。そこで、Manfroid et al. (2009) に従い、その遷移確率は一定としてパラメータ化して与えることとした。脱励起の遷移確率を Q とし、励起および脱励起過程については熱力学的平衡状態における詳細釣り合いが成立すると仮定して、励起確率を計算している。衝突パートナーである H_2O 分子の力学的温度は、通常の観測条件では 150K 以下となるのが普通である (太陽からの距離およびガス生成率に依存する)。彗星コマ内部では電子や中性分子、イオンなどは十分な衝突によってほぼ熱力学的平衡状態にあり、同程度の力学的温度を有すると考えられる。実際、近赤外線高分散分光観測から得られる分子の回転励起温度は、100K 前後となることが多い。しかし、Manfroid et al. (2009) で指摘されているように、CN 分子のライン強度を再現するには (彼らは B-X バンドを再現することを目的としている)、衝突パートナーの力学的温度として 300K 程度の成分が必要となる。このことについて Manfroid et al. (2009) では、導入した温度パラメータは衝突パートナーの力学的温度を反映するものではなく、実効的な励起温度のパラメータである、と考えている。しかし、彗星コマ内側では基本的に H_2O 等との衝突によって基底振動状態の停在数分布は熱化されている (ボルツマン分布的になっている) と考えられるので、光解離反応で CN が HCN から生成された直後に回転や振動エネルギー的に励起されている効果が入っていると考えている。

発光モデルは、これらの遷移を取り入れ、統計平衡を仮定して計算を行っている。実体は、考慮したエネルギー準位の数を N とすると、 $N \times N$ の係数行列をもつ連立 (代数) 方程式で表されるシス

テムである。このシステムを特異値分解法によって数値的に解いた。

3. 結果と議論

本研究で開発した CN 分子輝線モデルの結果については、図 3 に観測データと共にプロットした。また、図 3 では $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$ のみをプロットしているが、彗星に存在する同位体についてもプロットしたのが図 4 である (バンドヘッド付近を拡大)。本研究で開発したモデルによってほぼ観測スペクトルが再現できている。ただし、図 3 および図 4 では地球大気の透過率の影響を考慮している。仮定した同位体比は $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=90$, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}=150$ であり、可視光線波長域で観測される CN (Violet system) の輝線スペクトルから得られる典型値である (Manfroid et al. 2009)。観測の S/N 比は、図 4 の例では十分とは言えない。また、観測データは波長分解能が $R=28,000$ で得られたものであるが、この波長分解能では十分に輝線を分離できておらず (輝線プロファイルの裾野が広がっているため十分に輝線フリーの領域が得られていない)、微弱な輝線の検出感度を下げてしまっている。ただし、この観測データは WINERED が装置内に起因する熱輻射の低減化対策をする以前のものであり、現状では熱背景放射に起因するノイズは劇的に下がっている。実際、2016 年 2 月に観測した C/2014 Q2 (Lovejoy) 彗星のスペクトルでは非常に高い S/N 比を達成できた。当該データの解析が、今後の課題である。また、WINERED は 2016 年度から波長分解能 $R=90,000$ の高分散モードでの観測を開始する。現行の約 3 倍の波長分解能によって、より微弱なラインの検出が可能となる。適切な次期に明るい彗星が出現することが待ち望まれる。

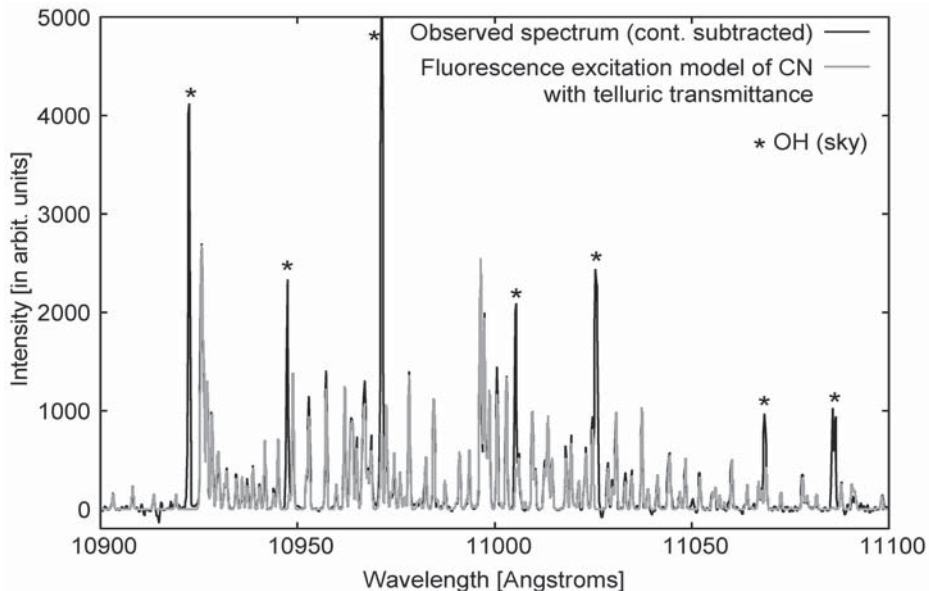


図 3 : 実際に WINERED で観測された発光スペクトル (C/2013 R1 (Lovejoy) 彗星 : 濃線) と発光モデル (薄線)

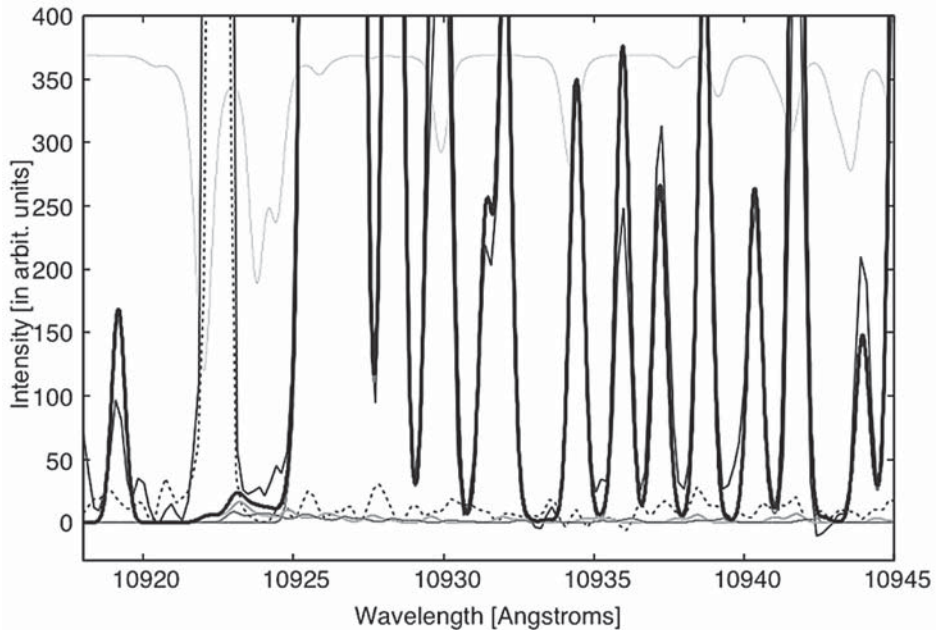


図4：CN red-system バンドのバンドヘッド付近 ($^{12}\text{C}^{14}\text{N} + ^{13}\text{C}^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}^{15}\text{N}$ = 合計：黒太線，ただし $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=90$ ， $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}=150$ を仮定)。グラフ上部の薄線は地球大気の透過率曲線を示しており，CN 輝線モデル結果に考慮されている。点線は地球大気中の輝線スペクトルである。

謝辞

本研究は、京都産業大学第3次総合研究支援制度「新規研究課題挑戦支援プログラム」(2015年度)の支援を受けて行われた。また、本研究を遂行するにあたり、特に観測面において神山天文台・赤外線高分散分光ラボのメンバーに多大なる協力を得ている。この場を借りて謝意を表したい。

参考文献

- (1) Brooke et al. (2014), ApJSS, 210, 23.
- (2) Kleine et al. (1994), ApJ, 436, 885.
- (3) Manfroid et al. (2009), A&A, 503, 613.
- (4) Zucconi & Festou (1985), A&A, 150, 180.

Research report: “High-resolution Spectroscopic Survey of Cometary Molecules in Near-infrared Wavelength Region (2)”

Hideyo KAWAKITA

Abstract

In this study we discuss about emission lines caused by CN radicals in cometary coma. We have a plan to survey cometary emission lines (including unidentified lines) in 1-micron wavelength region by the high-sensitivity and high-resolution near-infrared spectrometer WINERED equipped with the 1.3m-Araki telescope in Koyama Astronomical Observatory, Kyoto-Sangyo University, Japan. In the target wavelength region (0.9 - 1.3 microns) emission lines from CN radicals are prominent and to be subtracted in order to search for weaker emission lines (isotopologues of CN and other complex molecules). Accurate emission model for CN in cometary coma has been developed based on the recent laboratory studies and theoretical works.

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

