

池谷・張彗星における未同定イオン分子輝線の観測

河北 秀 世

〈京都産業大学 〒603-8555 京都市北区上賀茂本山〉

e-mail: kawakthd@cc.nao.ac.jp

ぐんま天文台では、さまざまな彗星の可視・低分散分光観測を、65 cm 望遠鏡と小型低分散分光器 (GCS) を用いて行っています。2002 年に観測した池谷・張彗星の場合には、彗星が太陽にかなり近づいた状態での観測に成功し、従来から未同定であったイオン起源と考えられる輝線の検出に成功しました。そして、この観測結果と実験データとの比較から、未同定輝線が水イオン (H_2O^+) 起源であることが明らかになったのです。これは、従来考えられていたような太陽光による蛍光散乱発光メカニズム以外に、太陽風との衝突相互作用が彗星イオンの発光に影響を与えていることを示唆する結果となりました。

1. はじめに

10 m や 8 m といった大口径の望遠鏡が活躍し、4 m クラスが中口径と呼ばれる現在、小口径といえば 1-2 m クラスを指すようになってしまいました。ましてや 1 m 以下なぞ、微小口径？とでも言わないと申しわけないような状況です。そんな状況において、1 m 以下の望遠鏡でどんなサイエンスをするのかと考えると、よほど面白いテーマを選ぶ必要があることは明らかです。大望遠鏡では望遠鏡を長時間占有した観測がやりにくいことや、観測スケジュールが臨機応変に変えにくいことなど考えれば、天体の時間変化を長期間にわたって追うような観測テーマ、突発的な天体現象の観測ということがすぐに思い浮かびます。しかし、ガンマ線バーストのような天文学者一般に非常に関心の高い現象については、いかに大望遠鏡がスケジュールしにくいとはいえ、天文台の裁量で観測が行われることもしばしばです。

そんな状況下で、われわれのグループでは、発見後間もなく観測の好機を迎えるような（通常の半年ごとのプロポーザル申請を行うような共同利

用観測では好機に観測できない）彗星を主なターゲットとして観測を行ってきました。特に、太陽に近づいて、地球から見たときの太陽との離角が小さくなった彗星は、朝夕の低空での観測となり、大望遠鏡でもなかなか向けられないことが多いものです。こうした状況下での観測が必要となる研究テーマを選べば、口径 1 m 以下の望遠鏡にも活躍の場があるのです。

2. 彗星に含まれるイオンの観測

彗星のぼーっとした姿や長い尾は、直径数 km から数十 km 程度の氷と塵の塊からなる「彗星核」から蒸発・放出されたガスや塵によって形成されたものです。その彗星核は、約 46 億年前に原始太陽系星雲の中で形成された微惑星の残存物と考えられており、その氷組成や塵の鉱物組成などから、太陽系形成初期の物理環境を探るプローブとして重要視されてきました。特に彗星氷の化学組成は、分子雲などにおいて検出されている星間分子の組成比と似ており、非常に多種多様な分子を含んでいるものと考えられています。しかし、ごくまれに現れる明るい（言い換えると彗星

核が大きな) 彗星を除いて、彗星氷中の微量分子種の検出は非常に困難です。現に、彗星氷中の水分子 (H_2O) やシアン化水素 (HCN) の重水素置換体 (HDO や DCN) は、2, 3 の非常に明るい彗星で検出されたことがあるだけです。

現在、彗星の観測は、X 線から電波まで広い波長域において行われていますが、最も歴史が長いのは、やはり可視光領域です。19 世紀中頃には、眼視分光観測 (!) によって彗星コマの中に C_2 のバンド輝線が認められるなど、分光観測も早くから行われていました。可視光では地球大気の邪魔も少なく、他の波長に比べて S/N 比の高いスペクトルデータが比較的容易に得られます。しかし、彗星氷の中に含まれている分子の多くは、可視光では輝線を発しません (そうした分子の多くは電波あるいは赤外線領域で輝線を発します)。そのため、従来の可視光分光観測では、氷中に含まれていた分子が太陽紫外線で光解離されて作られるような簡単なラジカルのみが観測されてきました (CN , C_2 , C_3 , NH_2 など)。一方、彗星氷中に含まれている分子が昇華し、太陽紫外線などの影響でイオン化すると、中性分子のままではほとんど可視光輝線を出さなかった分子でも、可視光領域で強い輝線を出す場合があります。 H_2O や CO , CO_2 などがその例です。 H_2O や CO_2 などは地球大気にも大量に含まれていますから、たとえ電波や赤外線でも観測しようとしても地球大気の強い吸収のために観測できません。こうした理由から、彗星分子のイオンを見て元の分子を探るという手法は、非常に重要であると考えられています。

しかし、中性分子がイオン化するには太陽との距離が近い方が効率が良く、イオンの作る尾などは彗星と太陽との距離が近くならないと発達しません。そのため、イオンの尾の観測に適した時期は、彗星の太陽離角が小さいことが多いのです。その場合、日没直後に観測の準備を始める必要があったりするのですが、大望遠鏡ではシーイング対策などの理由から、あまり早くからドームス

リットを開けられないことがあります。また、彗星の見かけの位置が低く、望遠鏡を向けて良いとされる範囲を超える場合もあります。そうしたなかで、小さな口径の望遠鏡が活躍できる場があるのです。

3. 未同定イオン輝線

彗星のスペクトルには、X 線から電波領域に至るまで、さまざまな分子や原子の輝線が見られますが、その中には、いまだに同定されていない輝線が思いの外たくさんあります。最も観測の歴史が長い可視光領域でさえ、数千本の未同定輝線が存在するのです。そのなかでもイオンの尾に見られる未同定輝線は強度も強く、議論的になっています。 H_2O や CO_2 などがイオンになることで輝線を可視光領域で発するように、このイオンも重要な分子の (もしかしたら未検出の分子の) イオンである可能性があります。この未同定イオン輝線は、1986 年にハレー彗星のイオンの尾において初めて観測されました (Wyckoff et al.)¹⁾。その輝線スペクトルは、 H_2O^+ や CO^+ , CO_2^+ といった、すでに存在が知られていたイオンでは説明ができないものでした。その発見から 10 年以上、この未同定輝線についての研究はあまり進みませんでした。その未同定輝線が観測されるような明るい彗星が現れなかったというのも理由の一つでしょう。そうした状況下で、発見者の Wyckoff らは明るい彗星をひたすら待ったのです。

幸い、1996 年の百武彗星、1997 年のヘール・ボップ彗星と明るい彗星が立て続けに現れ、イオンの尾の観測が行われました。その結果、比較的良好なスペクトルが得られたのですが、不思議なことに百武彗星には未同定輝線が見られるのに、より明るくなったヘール・ボップ彗星にはほとんど未同定輝線が認められなかったのです。Wyckoff らは再びさまざまなイオンの発光モデルを使って未同定輝線の同定を試みました。スペクトルは彗星コマの最も明るいところから反太陽方向

にオフセットした場所を観測して得られており、電荷をもったイオンでなければその場所には存在していないはずですが(イオンのみが太陽風によって反太陽方向へと延びた分布、つまり尾になっているため)。ですから、この未同定輝線が何らかのイオンによるものであることは間違いないと考えられます。また、比較的分散の高いスペクトルから、原子ではなく分子によるバンド構造であると考えられていました。しかし、1999年に出版された Wyckoff らの論文²⁾では多くのイオン分子を候補として未同定輝線の同定が試みられましたが、結局、すべて失敗に終わってしまいました。彼女らは1999年の論文中で、未同定輝線が H_2O^+ 輝線の強度と相関している可能性を指摘し、彗星コマ中における H_2O^+ の生成にかかわる化学反応に関連した何かのイオンではないか? と述べています。

4. 池谷・張彗星と未同定輝線の観測

池谷 薫さんといえば、彗星の研究者には1969年の池谷・関彗星の発見者として非常に有名なアマチュア天文家です。その池谷さんが2002年の1月末に、新しい彗星を眼視による搜索から発見されました。同じ彗星を中国の張さんも独立に発見

し、池谷・張彗星と命名されました。プロの天文学者による機械的な大規模サーベイが行われるなか、こうしたアマチュア天文家による彗星発見が減っていたこともあり、一時期、話題となっていました。この彗星は、LINEAR や NEAT といった大規模サーベイの網をかいくぐるようにして移動していた彗星で、1月末に発見された後、1カ月後には観測好機になっていました。半年ごとに観測プロポーザルを提出する大望遠鏡の共同利用には、とても間に合いません。筆者らは、ぐんま天文台の65 cm 望遠鏡と小型分光器 (Gunma Compact Spectrograph; GCS) を使った観測を開始しました。

ここで用いた小型分光器 GCS は、2000年から運用を開始した非常にコンパクトな低分散分光器で、波長分解能は $R=500$ と $R=2,000$ のいずれかを選択できます。彗星観測の場合には、 $R=500$ として、波長 380–760 nm の範囲を一度に観測するモードで利用しています。スリット長が10分角ありますので、広がった彗星のコマを分光するとともに、スカイのスペクトルを同時に得ることができます(地球にたいへん近づいてコマが大きくなった彗星の場合はスカイを別に取得する必要がありますが)。私たちは彗星のコマのガス成分比

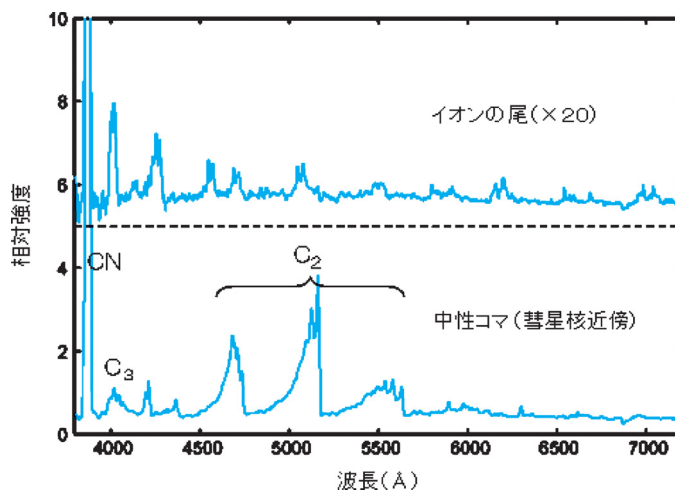


図1 池谷・張彗星の可視光スペクトル。

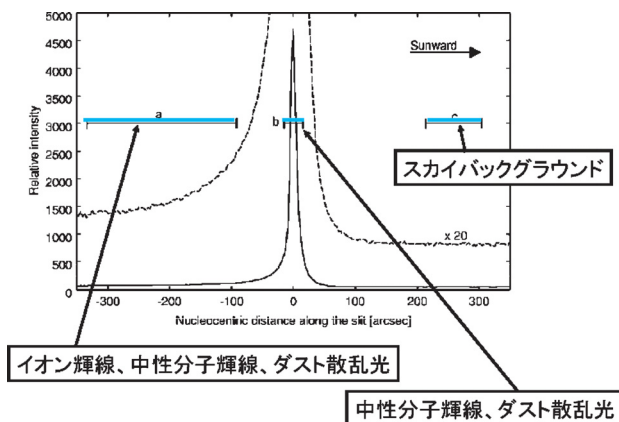


図2 スリット方向の輝度分布とアパーチャー。

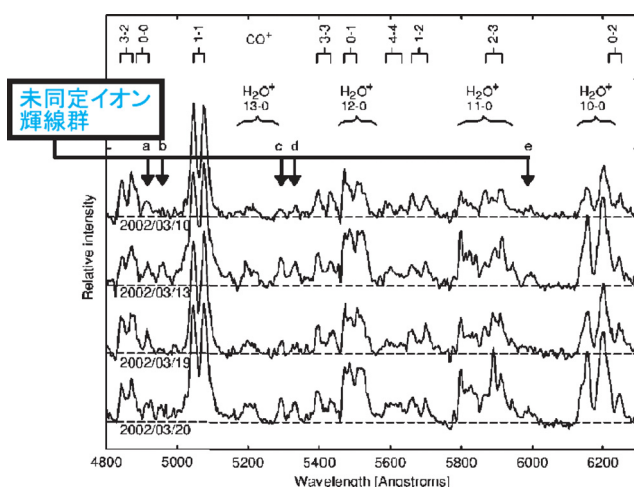


図3 イオン分子輝線スペクトル (2002年3月10日-20日)。

を統計的に議論するための観測をさまざまな彗星について行っていますので、できるだけ観測条件の良い(地平高度が高く、彗星が明るい)時期に観測を行っています。彗星発見直後の2月にはそうした観測を行うことができました。しかし、この彗星は太陽に接近した頃にも比較的観測しやすい彗星でしたので、3月入って彗星が太陽に近づいた頃にイオン分子の観測も試みようということになりました。そこで、分光器のスリットを太陽・反太陽方向に向け、スリットにイオンの尾が乗るような配置で分光観測を行ったのです。

図1は得られた低分散スペクトルです。輝度中

心付近の中性ガスが多い部分と、反太陽方向に偏った部分(イオンの尾の根元に相当)とで、別々に1次元化してみました。ガスの輝線と塵によって散乱された太陽光スペクトルが混在しています。彗星スペクトルは、スリット上、彗星核付近のコマ中央部ではイオンの輝線が見られず、反太陽方向になるにしたがってイオン分子輝線が顕著になってきます。そこで、彗星コマの反太陽方向に離れた部分のスペクトルを抽出し、そこから中性分子の輝線スペクトルを差し引くという手法をとりました。中性分子輝線は彗星コマの中央部から、スカイのスペクトルは彗星コマから太陽方

向に離れた部分から抽出しました (図 2). その結果, 図 3 に示したようなイオン分子輝線のみスペクトルが得られています. 観測は 2002 年 3 月 10 日から 20 日までの間に 4 日間行われ, そのすべての日において, CO^+ および H_2O^+ の輝線, そして未同定イオン分子輝線が確認されました.

5. 未同定イオン分子輝線の正体は何か?

すでに Wyckoff らによって, ハレー彗星, 百武彗星, ハール・ボップ彗星についての研究が行われていましたが, そのなかで, スペクトル中で検出された H_2O^+ と CO^+ の数密度比を横軸に, 縦軸には未同定輝線と CO^+ の輝線フラックス比をとったグラフを元に議論が行われていました. そこで, 筆者らもそれにならって観測データをグラフ化したものが図 4 です. 観測が行われた 4 日間に, スペクトル中の輝線比も変化をしています. H_2O^+ と CO^+ の数密度比もファクターで 2 程度変化しています. こうした変化は, 主に太陽風中のプロトン密度や温度の変化などが影響していると考えられます. 彗星のイオン分子は, 中性分子が太陽風と相互作用することで生成されますので, 太陽風の条件が変化すると, 生成されるイオン分子の量にも変化が現れるのです. 実際, 彗星

観測当日における太陽風の物理状態 (太陽風中のプロトン密度, 温度そして太陽風速度) の変化は非常に激しく, こうした擾乱が影響していると考えられます. また, イオンの尾には微細構造が見られており, 太陽風磁場との相互作用によって時間単位で変化しています. スリット中にどのような部分がサンプルされたかによっても, 得られた結果が変化するようです.

さて図 4 に目を戻しましょう. 図中には Wyckoff らによって得られた三つの彗星での結果も示してあります. 筆者らの結果を加えると, H_2O^+ と未同定イオン分子輝線強度との相関が, よりいっそうはっきりしてきました. Wyckoff らが主張したように, H_2O^+ の生成と関連した何らかのイオン分子, 例えば H_2O^+ がさらにイオン化した H_2O^{2+} や, H_2O^+ が壊れてできる H_2^+ なども候補かもしれません. Wyckoff らは, こうしたイオン分子については考慮していませんでした. しかし, そもそも強い輝線が受かっている以上, イオン分子の量が豊富であるか, イオン分子 1 個当たりの発光効率が非常に高い必要があります. 水分子は彗星氷中で最も豊富な分子であり, そのイオン分子も非常に豊富であると考えられます. H_2O^+ , CO^+ , CO_2^+ 以外に豊富なイオン分子がほかにあると考えるのは難しいのではないかと

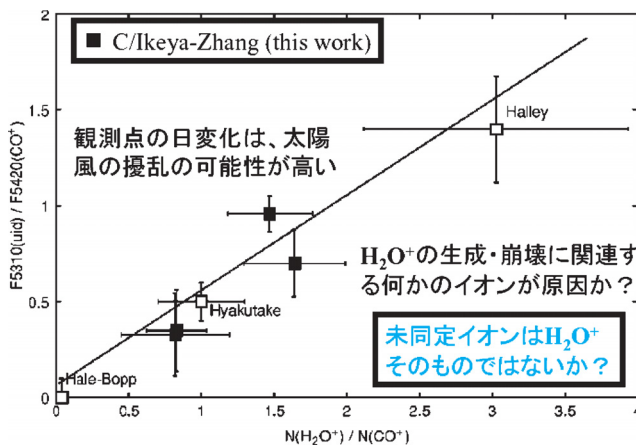


図 4 未同定輝線と CO^+ , H_2O^+ 輝線との関係.

というのが私たちの最初の印象でした。そのため、そもそも Wyckoff らのモデル計算が間違っており、未同定輝線は H_2O^+ で説明できるという可能性を再度検討する必要があるように思われたのです。

6. H_2O^+ イオン分子の輝線

そもそも、 H_2O^+ と彗星は非常に密接な関係があります。彗星核が水分子を主成分とする氷の塊であるということは 1950 年代に Whipple によって「汚れた雪玉モデル」として提唱されました。しかし、当時、肝心の水分子が彗星に検出されたことはなかったのです。水分子の輝線は地球大気によって吸収されてしまうため、観測が困難だからです。赤外線の高感度の良い検出器がなかったことも原因でしょう。さて、1973 年になって、コホーテク彗星という明るい彗星が現れました。この彗星のスペクトル中に H_2O^+ の輝線が初めて同定され³⁾、実験室における H_2O^+ の分子定数測定が、盛んに行われるようになったのです。こうして、彗星核の主成分が水の氷であることが初めて（間接的にですが）確認されました。彗星の観測が新しい分子定数の決定を促した例は、これ以前にも C_3 分子の例があります。

実験室における H_2O^+ イオン輝線についての詳細な研究が、1976 年に Lew によって出版されました⁴⁾。彼らは可視光領域に見られる H_2O^+ の遷移について、その帰属を決定し、分子定数と遷移の確率を計算しました。このデータを元に、彗星の尾における H_2O^+ 輝線の発光メカニズムが検討され、Wyckoff らは太陽光による蛍光散乱が発光を生じる主な機構であると結論づけました⁵⁾。

しかし、1990 年代になって Lew らの帰属決定に誤りがあったことが指摘されています^{6), 7)}。どうやら、上位の電子・振動励起状態における振動量子数が、量子数で二つ分ずれていたようです。そうすると、そもそも Wyckoff らが未同定輝線の

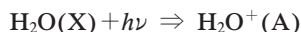
同定に使用した発光モデルが誤っている可能性があります。また、太陽光による蛍光散乱以外の発光メカニズムも検討する必要があるでしょう。例えば、太陽光による蛍光散乱では、



となって励起された $\text{H}_2\text{O}^+(\text{A})$ から、



となって輝線が発せられます。しかし、 H_2O が紫外線によってイオン化する際にも励起状態の H_2O^+ が生成され、



となり、この励起状態の H_2O^+ から輝線が生じます。また、太陽風中のプロトンとの電荷交換反応によっても、



のように電子・振動励起された H_2O^+ が形成されるのです。これらの励起メカニズムにおける励起状態のポピュレーション分布には、メカニズムの違いに応じて差が生じるため、得られる輝線スペクトルに違いが見られるはずですが、こうしたモデル化によって、励起メカニズムについても再検討が必要でしょう。しかし当時、可視光領域の H_2O^+ バンドについて、新しい帰属に基づいた遷移確率の計算は行われていませんでした。これでは正確にモデル計算を行うことが難しいと考えられます。そこで筆者らは、実験室における H_2O^+ の発光実験を調査することを始めました。 H_2O^+ は地球の高層大気の化学に重要だそうで、実験室における H_2O のイオン化・発光実験のデータを探し出すことができました。実験中では H_2O の気体にネオンや窒素分子のイオンを照射し、 H_2O をイオン化しています。このとき、衝突させるイオンのエネルギーを変化させると生成される H_2O^+ の輝線スペクトルが変化するのですが、比較的大きなエネルギーで衝突させたときのスペクトルに、まさに未同定イオン分子輝線とそっくりの輝線群が記録されていたのです。これらの輝線群は、最近のバンド同定によって帰属が決定され

ています。こうして、10年以上も不明だった未同定輝線の正体が、ようやく明らかになりました。未同定イオン分子輝線は、 H_2O^+ によるものだったのです。

7. さいごに

筆者らの結果が ApJ レターに報告されたことを受けて、最近、ドイツの量子分子化学計算を行う研究者らが H_2O^+ の電子・振動遷移確率を計算してくれました。今後、彼らの行った電子・振動遷移の確率計算結果をもとに、 H_2O^+ の発光モデルを再構築する必要があります。こうしたモデル化の試みにより、彗星のイオンの尾中における物理状態について、新しい知見が得られる可能性があります。また、詳細な H_2O^+ のモデル化が進めば、 H_2O^+ の観測からイオン化する前の H_2O についてオルソ/パラ比が得られると考えており、現在、研究を進めているところです。

以上のような成果が口径 65 cm という小さな望遠鏡で行われたことは非常に興味深いことだと思います。彗星未同定イオン分子輝線の正体は、わかってみれば、なんだという結果で、その正体が10年以上もわからなかったのが全く不思議な気がします。しかし、大勢の人が常識だと思っていることを疑うことから、小さな望遠鏡でも面白いサイエンスができたという良い例だと思っています。ここまで読んでいただいた読者のみなさま、ありがとうございました。

謝 辞

本研究の共同研究者である国立天文台の渡部潤一助教授に感謝いたします。また、本研究で紹介した観測は、2000年から継続している彗星・可視分光サーベイの中で観測されたものです。このサーベイは、現在、ぐんま天文台の浜根寿彦さんを中心にして継続しており、そのサンプル数もこ

の5年間でようやく10個を超えてきています。浜根さんをはじめ、ぐんま天文台スタッフの皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) Wyckoff S., et al., 1986, in ESA Proceedings of the 20th ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet. Volume 1: Plasma and Gas, p. 311
- 2) Wyckoff S., et al., 1999, ApJ 512, L73
- 3) Herzberg G., Lew H., 1974, A&A 31, 123
- 4) Lew H., 1976, Can. J. Phys. 54, 2028
- 5) Wyckoff S., Wehinger P. A., 1976, ApJ 204, 604
- 6) Brommer M., et al., 1993, J. Chem. Phys. 98, 5222
- 7) Dressler R. A., Arnold S. T., 1995, J. Chem. Phys. 102, 3481
- 8) Kawakita H., Watanabe J., 2002, ApJ 574, L183

Unidentified Ionic Emissions in Comet 153P/Ikeya-Zhang

Hideyo KAWAKITA

Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University, Motoyama, Kamigamo, Kitaku, Kyoto 603-8555, Japan

Abstract: We have performed low-dispersion spectroscopic observations of comets in optical using the 65 cm telescope with the Gunma Compact Spectrograph (GCS) at Gunma Astronomical Observatory. Comet Ikeya-Zhang that appeared in Spring 2002, was also observed by the 65 cm/GCS and unidentified ionic emission lines could be detected in the spectra. Comparisons between the observed spectra and spectra taken in laboratories indicate that the unidentified emission lines can be assigned to the rovibronic transitions from water ion (H_2O^+). Interaction between cometary ions and the solar wind may play an important role for the emission from water ions.