

彗星・星間分子における原子核スピン異性体存在比

Abundance Ratios of Nuclear Spin Modifications in Cometary and Interstellar Molecules

(日本天文学会推薦)

代表研究者 京都産業大学 河北秀世 Kyoto Sangyo University Hideyo KAWAKITA
協同研究者 国立天文台 渡部潤一 National Astron. Obs. Japan Jun-ichi Watanabe
西はりま天文台 森 淳 Nishiharima Astron. Obs. Atsushi Mori
早稲田大学 古荘玲子 Waseda University Reiko Furusho

Comets are thought to be remnants of the planetesimals formed in the early Solar System 4.6 Gyrs ago. Chemistry in comets is clues to the formation and evolution of materials used for the Solar System formation. Here we present molecular emission spectra in the near-infrared region. Many organic molecules can be detected in this region. The origin of comets and the Solar System are discussed.

研究目的

彗星の正体は、約46億年前に太陽系誕生に際して形成された直径数キロ・メートル程度の氷と塵の塊である。これらの塊は惑星を形成する元になった（微惑星と呼ばれる）と考えられるが、一部はそのままの状態です太陽系内に留まり、現在でも、相当数が残存している。彗星は、この氷と塵の塊が太陽に近づく軌道をとるようになった際に、太陽光による加熱によって氷がガス化、薄い大気を形成するに至ったものである。そのため、彗星の観測によって46億年前の太陽系形成初期に存在した種々の分子の存在比を知ることができる。それらの分子は、太陽系形成以前に存在していた星間分子が化学的に進化した（あるいは、ほぼそのまま取り込まれた）ものであると考えられている。そして、彗星・星間分子の研究を通じて、我々の太陽系の起源を明らかにすることが、彗星研究の重要な柱の一つなのである。

従来、彗星氷中に含まれる種々の分子（主成分は H_2O である）の存在比率から、そうした分子組成比を達成するための物理条件（初期ガス組成比、ガス密度、温度など）が研究されてきた。しかし、彗星核（＝微惑星）の表面は、何度も太陽近傍に回帰するうちに、揮発性の高い分子が選択的に失われている可能性がある。そこで我々のグループでは、昇華温度の違いによる影響を受け難い指標として「原子核スピン異性体」の存在比を用い、彗星分子の形成環境を探ることを目指している。原子核スピン異性体とは、対称な位置に複数の等価な原子（ただし原子核スピンのゼロでない）を持つような構造をした分子において存在する異性体である。例えば、 H_2O の場合、二つの水素原子が対称な位置に存在しており、これらは等価である。水素原子はフェルミ粒子であるため、二つの水素原子を交換した場合には、分子全体の波動関数が符号を反転させなくてはならない。この性質が基本となり、特定の電子・振動・回転エネルギーを持った状態は、必ず特定の原子核スピン配置に対応するという事態が生じる。 H_2O 分子の場合、水素原子は原子核スピンとして $\pm 1/2$ の二通りの値をとることができ、二つの水素原子の原子核スピンの和が0か1かによって、二種類の異性体が存在する（オルソおよびパラ H_2O と呼んで区別している）。異なる原子核スピン異性体同士は、互いに放射を伴う遷移によってはほとんど変換されないという特徴があり、 H_2O などの場合にはオルソ・パラ変換時間は非常に長いと考えられている。一般には原子核スピン配置の変換には常磁性体などが触媒として必要であり、彗星氷の環境では、ほとんど変換が進まないと考えられている。そのため、彗星分子において観測される原子核スピン

異性体の存在比は、これらの分子が形成された環境（約46億年前）を反映していると考えられ、原始太陽系の環境を探るプローブとして利用できるのである。

本研究では、彗星氷に含まれる主な分子である H_2O および NH_3 、 CH_4 といった分子について、上記の視点から原始太陽系の形成環境について迫ることを目的とした。

研究経過

本研究は2006年7月末に2006年度研究助成の決定を受け、同年10月より2008年3月末までの期間、行われたものである。期間中、協同研究者の森 敦氏の逝去という非常に残念な出来事もあったが、新たな共同研究者を得て、研究をすすめてきた。以下に、テーマごとに経過を報告する。

1. 彗星分子における原子核スピン異性体存在比

2006年度には、NASAのDeepImpact計画に際して南ヨーロッパ天文台の8m望遠鏡によって得られたテンペル第一彗星の可視光・高分散スペクトルを用い、彗星氷中のアンモニア (NH_3) について原子核スピン異性体の存在比を調べた。DeepImpact計画では、彗星核内部の、より始原的な物質を掘削し、その情報を抽出することが目的であった。観測から、アンモニア分子のオルソ対パラ比が得られている。特に、DeepImpact計画におけるImpactorの彗星核衝突に伴って放出された NH_3 と、通常の状態では放出されている NH_3 とについて、オルソ/パラ比については有意な差は見られなかった。オルソ/パラ比が彗星核表面において、なんらかのメカニズムによって変性をうけている可能性は極めて低い。

また、2006年の5月に国立天文台ハワイ観測所の8m望遠鏡（すばる望遠鏡）で観測したシュバスマン・バハマン第三彗星（SW3彗星）の近赤外・高分散分光観測の結果についても研究を進めた。このスペクトル中には H_2O の輝線が多数記録されており、 H_2O 分子のオルソ/パラ比を得ることが可能である。しかし、そのためには彗星から放射される H_2O 輝線のモデルを構築する必要があった。発光は振動遷移に伴うものであるが、基本振動バンドではなく、いわゆるホット・バンドと呼ばれる遷移に属している（下位の振動状態が基底状態ではない）。そのため、発光モデルの構築には実験室データの不足や種々の困難が伴った。我々は、このモデル構築のため、彗星 H_2O ホット・バンドの研究を我々に先んじて行っているJohns Hopkins大学・応用物理学研究所のNeil Dello Russo博士と協力し、そのモデル構築を行った。2007年5月にはDello Russo博士を日本にお招きして協同で作業を行い、モデルを完成している。SW3彗星における H_2O 分子のオルソ/パラ比は、従来の彗星で得られていた温度範囲に比べて幾分、高めの結果が得られ、その解釈においては今後の検討課題であると言える。

更に、カリフォルニア工科大学がハワイに持つ10m望遠鏡（Keck望遠鏡）によって観測したマックホルツ彗星の近赤外高分散スペクトルの解析にも、2007年度から取り組んでいる。このスペクトルは非常に高い波長分解能と高い信号/雑音比を持っており、そこに含まれる情報は非常に多い。現在も解析は継続中であるが、特に原子核スピン異性体の存在比について、優先的に解析を行い、 H_2O および CH_4 について結果を得ている。

2. 星形成領域における星間分子の原子核スピン異性体存在比

2006年末に、代表的な星形成領域の一つである、NGC2024について、そこに存在する原始星IRS2を背景光とした星間分子吸収の観測を波長3ミクロン帯で行った。2007年度はその解析にも着手し、HCN、 H_2CO などの星間分子による吸収を探したが、残念ながらIRS2の手前には十分な量の星間分子が存在しておらず、高い信号/雑音比のデータが得られ

ていたにもかかわらず、星間分子の吸収は得られなかった。その後、同様の観測を別のターゲットについても行うべく、すばる望遠鏡の観測時間に応募しているが、現在のところ、天候条件などの問題もあって新たな観測は成功していない。

考察

本研究で得られた知見の中で、非常に重要なものの一つがテンペル第一彗星における観測結果である。テンペル第一彗星は、NASA の DeepImpact 計画のターゲットとなった彗星であり、Impactor と呼ばれる衝突機を彗星核表面に衝突させ、彗星核内部の、より始原的な物質を掘削する事が目的であった。この衝突の前後で、南ヨーロッパ天文台の 8 m 望遠鏡 VLT を用いた可視光高分散分光観測を実施しており、そのスペクトルから、彗星氷中のアンモニアのオルソ/パラ比を得ることができた。その結果明らかになったことは、衝突時に放出された、彗星核のより内部に存在していたアンモニアと、通常の状態で見られていたアンモニアとでは、オルソ/パラ比に有意な差が見られなかったことである。このことは、当初より予想されていた、「オルソ/パラ比は太陽光による加熱などの効果によって、ほとんど影響をうけない」という仮定の検証であり、彗星の始原的な性質を見るためには、従来どおり彗星核から蒸発してくる分子の観測を行えばよい（即ち、第二、第三の DeepImpact がなくても彗星の始原的な性質を明らかにできる）ことを意味している。これによって、これまでに蓄積されてきた観測データに見られる多様性が、彗星核表面における変性の結果ではなく、彗星核を構成する物質の起源における多様性に直結する可能性を示すことができた。

また、一方で、SW3 彗星における H₂O 分子のオルソ/パラ比の測定結果は、従来の多くの彗星が示していた温度範囲（25～35 K）よりも高い温度での分子形成の可能性を示唆しており、我々が「彗星」としてひとくくりにしている天体の多様性を改めて示すことになった。彗星は、その軌道要素によって「オールト雲起源彗星」と「カイパーベルト起源彗星」に分類されることが多い。SW3 は後者であり、これまで測定されてきた多くの彗星は前者である。そのため、一見すると原子核スピン異性体の存在比（あるいは、それが示す平衡温度：原子核スピン温度）は、彗星核の起源を反映する可能性があると思われる。しかし、先に述べたテンペル第一彗星も上記の分類では後者にあたり、SW3 彗星と同類のはずである。にもかかわらず、テンペル第一彗星のアンモニアにおけるオルソ/パラ比は約 25 K という温度を示しており、単純な解釈が成り立たないことを意味している。これについては、現在、カイパーベルトと呼ばれる領域に存在する微惑星（彗星核）は、二つの異なる領域でもともと形成された微惑星ではないかという仮説が、太陽系内小天体の軌道進化をシミュレーションした結果から得られている。また、SW3 彗星が非常に特殊な彗星であった可能性も否定できない。同彗星は多数の破片に次々と分裂するという特異な振る舞いをみせた彗星である。成分的にも構造的にも、他の一般的な彗星とは区別するべきかもしれない。確かに、我々の観測からも、SW3 彗星はいくつかの成分について欠乏した、化学的に特異な成分をもった彗星であったことが分かっている。

もう一つの重要な成果であるマックホルツ彗星の近赤外高分散分光観測の結果については、既に述べたように H₂O および CH₄ の原子核スピン異性体の存在比について優先的に解析を行った。その結果、この彗星も比較的高めの温度領域（CH₄ の原子核スピン異性体からは 40 K 以上）で形成された分子が多く含まれている可能性が得られた。水やメタン分子に含まれる重水素の含有率などからも、同様に比較的高温環境下での分子生成が予想されている。分子組成比については現在も解析が進行中であるため、暫定的なものであるが、すでに一部は国際会議などで発表している。ただし、分子組成比においては高温環境下での分子生成を示す兆候がみられず、この彗星の起源については、現在も議論中である。

以上の結果をまとめると、本研究において、彗星氷中の分子における原子核スピン異性体存在

比の研究が、大きく前進したといえる。特に、DeepImpact 計画に関連して、従来どおり表層付近から昇華してくるガスの原子核スピン異性体存在比が、より内部の始原的な成分と優位な差が無いという事実は、従来のそして今後の地上観測が彗星氷の起源究明において重要な役割を果たし続けることを意味している。現在も観測サンプルは徐々に増えつつあり、また、本研究において行った分子発光モデルの開発を通して、観測結果の解釈がより正確になってきた。モデル開発においては今後もさらに改良が加えられるであろうし、観測においては今後、更に高い波長分解能の観測データを用いた解析が進むと考えられる。本研究でも2008年1月に南ヨーロッパ天文台において、タートル彗星に関し、現在最高レベルの近赤外高分散分光データを得ることができている。今後は、このデータの処理およびモデルとの比較を通じて、本研究で得られた内容の詳細な検討が更に進むと考えられる。

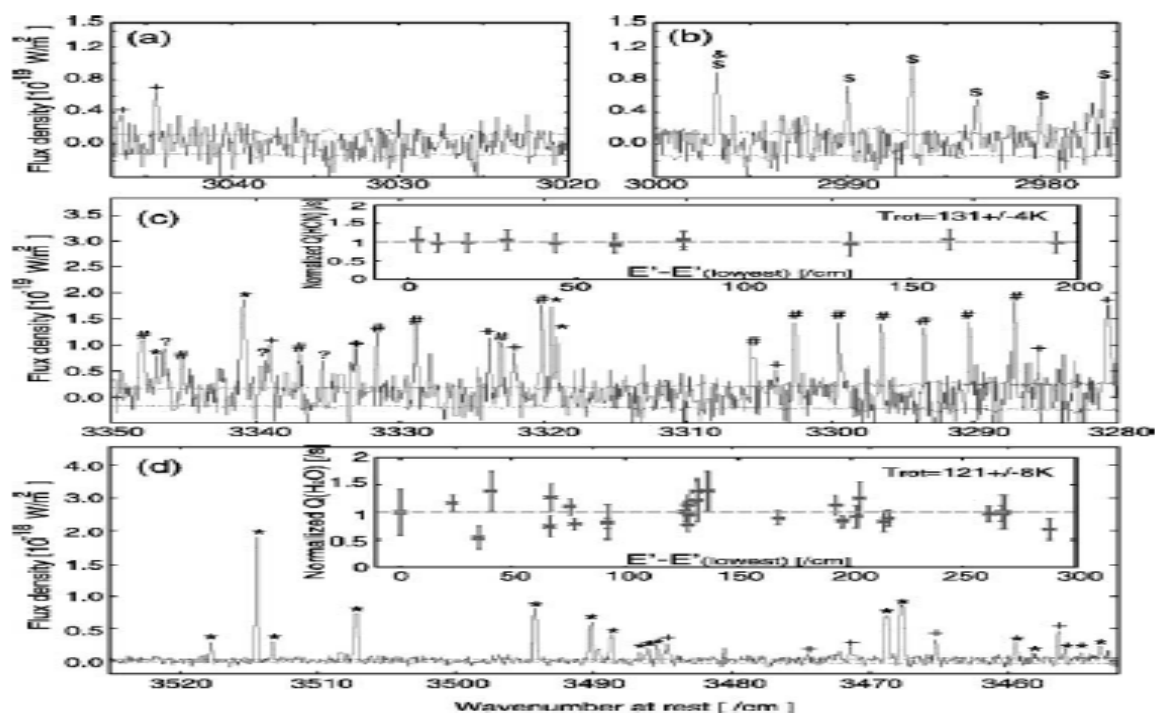


Fig 1. Infrared spectra of comet 73P-B/Schwassmann-Wachmann 3 (Kobayashi et al. 2007).

研究発表

口頭発表

1. Kawakita et al. (2006), American Astronomical Society, DPS meeting #38, #12.03
2. Kobayashi et al. (2007), American Astronomical Society, DPS meeting #39, #53.14
3. Kawakita et al. (2007), American Astronomical Society, DPS meeting #39, #53.13
4. 河北他 (2008)、日本天文学会春季年会

誌上発表

1. Kawakita et al. (2007), Icarus, Volume 191, Issue 2, p. 513-516
2. Kobayashi et al. (2007), The Astrophysical Journal, Volume 668, Issue 1, pp. L75-L78.
3. Bonev et al. (2008), Icarus, in press.

4. Kawakita et al. (2008), submitted to The Astrophysical Journal
5. Kobayashi et al. (2008), submitted to The Astrophysical Journal
6. Kanda et al. (2008), submitted to Pub. Astron. Soc. Japan.