

論文内容の要旨

本論文は、流星および流星発光後に長時間輝くクラウド（永続痕；persistent trains）の未解明の発光過程について分光学的手法で観測的研究を行い、発光物質、励起温度、発光メカニズムなどについて明らかにした研究である。

「流星」とは、サイズが mm から数 cm 程度のダストが、秒速数 10km という高速で惑星間空間から地球大気に突入する際に、地球大気との衝突によって発光する現象である。発光高度は約 100km の電離圏（中間圏、熱圏）で、最小ダストの直径は 0.1mm、質量にして $1\mu\text{g}$ 程度である。流星の中でも特に母天体が彗星や小惑星であるものを群流星と呼び、母天体から放出されたダストが形成するダストチューブの中を地球が通過する際に流星群として多数の流星が観測される。母彗星である Tempel-Tuttle 彗星が逆行軌道のため、対地速度が最も速い（ $\sim 71\text{km/s}$ ）惑星間空間ダストの一団として観測されるのが「しし座流星群」である。「しし座流星群」の 1 時間あたりの流星数をみると、数百から数千、時には数万に達するいわゆる「流星雨」と呼ばれるような出現数も過去に記録されており、母彗星の回帰周期に伴い約 33 年毎に観測されてきた。私は、「しし座流星群」という希少な現象を確実に捕える目的で、7 ヶ国から約 30 名の研究者達が集った NASA 主催の国際航空機観測ミッション（Leonid MAC）に 1999 年 11 月に参加し、主に分光観測を行ってきた。私が用いた分光装置は、370nm から 850nm の帯域をカバーした光電子増倍管（I. I.）付のモノクロ・ハイビジョン TV カメラ（II-HDTV）に対物グレーティングを装着したもので、これまで観測が難しかった近紫外域（370-400nm 付近）にピーク感度を持ち、更にデジタル 10 ビットの高いダイナミックレンジも備える全く新しい独創的な観測装置であった。国立天文台には、デジタル・ハイビジョンデータのコンバート処理を行う施設がないため、通信総合研究所や、民間の研究所の協力を仰ぎ、解析データの準備段階からかなりの労力を要した。データ解析に際しても、多数の原子分子が折り重なった複雑な流星の輝線スペクトルの同定、物理量の導出の精度を上げる目的で、シンプレックス法を用いた波形処理を流星スペクトルへ適応させるなどの新たな解析手法も確立した。今回、解析に使用したのは、クオリティーの高い「しし座流星群（Leonid）」3 イベント、および偶然観測に捕らえられた「おうし座流星群（Taurid）」1 イベントの計 4 イベントのスペクトルである。Leonid スペクトル中の Fe と Mg の時間変化は、地球大気成分の発光である酸素原子と同様のプロファイルを示すが、Na はこれらの物質よりも高高度で光始め、急速に減衰していくことが分かった。これは、超高速突入のため、より揮発性の高い Na から蒸発したことによる。一方、Taurid の Na は、Leonid と異なるプロファイルを示し、Fe や Mg と同様の変化を示した。これは、地球突入速度の違い、あるいは、惑星間空間を周回する間に Na が減少した事に起因すると思われる。また、Taurid スペクトル中の Fe/Mg アバundance は、Leonid の約 2 倍も高いことから、Taurid の母天体であるエンケ彗星は、より岩石質な天体であることが推察できる。エンケ彗星は、周期が 3.3 年と短いために太陽によって表層の揮発性物質がかなり失われた天体であることが予想される。これまで流星の励起温度は、550nm より短波長の金属輝線を使った温度平衡モデルで説明されてきたが、更に私は、対地速度が速い流星で現れるポテンシャル・エネルギーの高い分子に着目し、金属輝線の少ない長波長側（600-800nm 付近）に観測された窒素分子の first positive バンド

($B3\Pi_g \rightarrow A3\Sigma^+u$) について、分子モデル計算を介して電子、振動、回転温度を決定した。その結果、電子-振動温度はともに、 $T_{e,v=4} = 500K \pm 500K$ となり、鉄輝線で求まる励起温度、 $T = 4,500 \pm 300K$ と非常に良い一致を示した。この事は、熱平衡モデル近似の妥当性を示している。一方、初めて流星中の回転温度を試みたところ、 $T_r = 2,500 \pm 500K$ という温度が得られた。これらの振動-回転温度の差異は、化学平衡が十分に達成されず、厳密には温度平衡状態にはないことが示唆される。今後、分解能を上げた観測を行えば、更に詳細な議論が行えるであろう。流星の母天体である彗星は、太陽系が形成された当時の物質を閉じ込めた始原的な天体であると共に、惑星間塵や地上で採取される隕石（炭素質コンドライト）などの供給源とも考えられている。しかしながら人類は未だ、物質分析的にその起源を彗星と証明できる微粒子を持っていない。流星観測は、「地球大気を巨大なダスト検出器」に見たてた「地球に居ながらにしての彗星・小惑星探査」ともいえる。ハレー彗星探査で、C, H, O, N が豊富に存在している事が明らかになった事から、彗星物質（流星）には耐火性有機炭素が豊富に含まれ、それらが地球に供給されている事が指摘されているが、未だにその証拠が無い。私は、彗星コマ中で近紫外線の非常に強い輝線として観測される CN 分子 ($B2\Sigma^+ \rightarrow X2\Sigma^+$) のモデルスペクトルと、流星スペクトルの近紫外部を比較する事から、CN 分子の宇宙起源説の検証を行った。地球突入速度の遅い「おうし座流星群」の“光初め”に、CN 分子と思われる超過が認められたが、鉄輝線などのコンタミもあり更に慎重な議論が必要である。

「流星痕」とは、極めて明るい流星（火球）の流れた後に数分以上も残る輝くガス雲である。常に宇宙空間からエネルギーの供給があり輝いているオーロラなどと異なり、永続痕は一度だけの流星の衝突エネルギーだけで長時間輝き続ける。この長時間輝き続けるメカニズムが未解決であった。出現予測が全くつかない希少な現象にあるため、永続痕がどのような物質で構成されているかでさえ明らかにされていなかった為、私はこの突発天体現象を確実に捕えるための携帯式の分光器システムを製作した。「しし座流星群」は対地速度が大きく、大気との衝突で解放されるエネルギーも大きいため、流星痕が発生する確率が最も高い流星群である。その結果、1998年「しし座流星群」に伴う流星痕の分光観測に成功し、これまでにない高いクオリティのスペクトルを得ることができた。解析の結果、初期（流星消滅後約30数秒後まで）の永続痕には、マグネシウム、鉄が最も多く含まれ、次いでナトリウムやカルシウム、アルミニウムなどの金属原子が豊富に含まれている事が明らかになった。原子スペクトルのモデル計算を行い物理量の導出を試みた結果、初期（流星消滅後約20秒後）永続痕の励起温度は2,200Kという高温状態であることが明らかになった。しかし、流星消滅後約30秒後には約1,000Kへと急激にクーリングされ、40秒後にはもはや顕著な原子輝線はなく、600nm付近をピークに持つ分子バンドが支配している事が明らかになった。永続痕本体（0次光）の時間変化の比較から、クーリングが卓越した状況が推定でき、熱エネルギーが光エネルギーに何ら関与しない、化学ルミネッセンスが放射過程に効いていることが推察できる。流星起源の Fe, Mg, Na と地球大気起源の酸素原子による反応で、高励起状態の分子 (FeO, MgO, NaO) が生成され、長時間の発光に関与しているものと思われる。

論文の審査結果の要旨

流星現象の物理・化学的研究は、彗星自体の物性を考察する上で、あるいは彗星を通じて太陽系の起源や物理化学的進化を考える上で、さらには星間物質・星間塵との相関等に至る研究に通じる上で、かねてより非常に重要であると考えられてきた。しかしながら、流星現象の特殊性、すなわち出現する頻度の希少性と継続時間が短い現象であること、さらには出現場所および時刻の予測不可能性などの事情によって、データ取得が大変困難であり、高精度の観測、特に分光観測に基づく系統的な研究がなされていなかった。

さらに流星発光後に稀に長時間残る流星痕（永続痕）については、その現象そのものが非常に珍しいために、物理観測はほとんど行われておらず、大気との相互作用を含めて長時間発光のメカニズムはよくわかっていなかった。

申請者は、これらの困難を、33年ぶりに大量の流星をふらせ、かつ流星痕（永続痕）を出現させることも多い、しし座流星群の出現という希有な機会を捉え、1998年および1999年に両者の分光観測に成功した。それらの観測により得られた多数の原子・イオンなどからなる複雑な輝線スペクトルデータに対し、Simplex法を用いた独自の解析法を開発・適用し、物質組成比につながる輝線強度比決定および流星痕の発光物質の特定を含む下記のような重要な結果を得た。

1. 1998年のしし座流星群では、地上観測で得られた流星痕の分光写真観測から、流星痕の22の輝線を特定し、初期に卓越したマグネシウムや鉄が次第に消失し、長波長側の分子バンド構造が中心となることを見いだした。同時に、以前の研究者が主張していたような星雲線（禁制線）が存在しないことを明らかにした。決定した温度変化は痕跡の光度変化に比較して急激であることから、長時間にわたって光り続けるメカニズムは、chemiluminescence である可能性が高いことを示した。

2. 1999年のしし座流星群では、アメリカ航空宇宙局（NASA）の航空機観測チームの一員として、近紫外線領域に感度を持つNHK超高感度ハイビジョンカメラを駆使し、多数の流星本体の可視スペクトルを撮影し、このうちS/N比の高い良質のデータを選び、しし座流星群の流星について3例、おうし座流星群の流星について1例のついて解析を行い、約60の輝線および地球大気起源と思われる分子バンドを特定した。このうちしし座流星群の一例については、二つの飛行機による同時観測が成功しており、軌道決定によって原子輝線強度の高度による変化が世界ではじめて決定された例となった。

3. 流星本体の分光データ中の鉄の強度から、LTEモデルを用いて励起温度を4500K±300Kと推定した。これは先行研究結果と比較して非常に高精度である。また、この結果は、窒素分子の振動回転遷移輝線から推定したものとよく合っている。これらの結果に基づき、しし座流星群の流星体の化学組成を推定した。

申請者の研究成果は、データを得るのが困難であった流星および流星痕の分光観測を、

しし座流星群という希有な流星雨の機会を逃さずに観測を行い、それらのデータを高精度で解析したもので、流星物質とその母彗星の成分推定へ一歩踏み出した独自の研究ということができる。NASAの国際観測チームに主体的に参画し、高感度ハイビジョンカメラという最新鋭の観測装置を用いて、流星分光観測の新しい観測手法を実用化し、さらに従来では流星では適応されてこなかった解析手法を採用して、強度比決定から物質成分比推定への道を切り開いたものであり、高く評価できる。