

彗星のスペクトル

山下 泰正*

1. 彗星の形状

一般的にいて彗星は核、頭、尾の三つの部分から成りたっている。核は恒星状の光点であって、どんな大望遠鏡をつかっても、その視直径がはかられたことはまだない。そのスペクトルはフラウンホーファー線が存在を示し、明らかに太陽の反射光であることを物語っている。核の明るさ、すなわち反射光の強さから推定すると、核は直径数 km の固体の塊りである。彗星の質量は核に集中していると考えられるが、直接彗星の質量が測られた例はいまだないように思われる。核に関する上記の大きさをを用い、さらに密度を 2 g cm^{-3} 位に仮定すると核の質量、すなわち彗星の質量は $10^{18} \sim 10^{19} \text{ g}$ 位であろうと推定される。彗星が太陽から 5 天文単位以上の距離にあると、彗星は恒星状で核のみがみえる。太陽に近づくと核からガスや固体微粒子が放出されて、頭が形成される。

頭は球形の大气で、その直径は数万から数十万 km におよぶ。頭の部分の面輝度は核より外向きに暗くなるが、縁ははっきりしている。スペクトルには 2 種類あって、第 1 はフラウンホーファー線を示す連続スペクトルで、固体微粒子による太陽の反射光あるいは散乱光である。第 2 はガスによるもので、原子の輝線および分子のエミッション・バンドである。固体とガスの比は彗星ごとに大きく変わり、最近の例では、多胡一佐藤一小坂彗星では分子帯が強かったのに反して、ベネット彗星では連続光が強く現われた。

尾は通常、彗星が太陽に 1.5 天文単位以内に近づくと現われる。正常な尾は太陽と逆方向に現われ、二重の構造をもっている。スペクトルを調べると、まっすぐな尾はガスでできていて、彗星の運動よりおくれる方向に彎曲した尾は固体微粒子でできていることがわかる。両者は常に彗星の軌道面内にある。だから地球が彗星の軌道面から遠くはなれているときだけ、両者は分離してみえる。

彗星の輝度の極大、および尾の長さの極大は彗星が近日点を通過するとき起こる。そして少数の例外（例えば池谷・関彗星 1965f）を除いて、近日点通過の前と後とで、輝度、尾の長さ、スペクトルに違いはない。

2. スペクトル

約 10 年前にあらわれた統計によると、過去約 50 年の間に世界中のどこかでスペクトルの観測された彗星の数は

36。スペクトル乾板の数は約 300 枚ということである。この中にはもちろん対物プリズムによるスペクトルも含まれている。その後かなりの数の観測が行なわれているであろうが、彗星のスペクトルというものはまだかなり貴重なものであるらしい。特に赤外域のスペクトルについてはほとんど何もわかっていない。ついでながら上記の統計によると、同期間中に約 300 個の彗星について近日点付近での位置観測が行なわれたとのことである。彗星のスペクトル観測が困難なのは、面輝度が低いから明かいカメラをもつ分光器が必要なこと、一般に彗星は太陽に近く充分に露出時間がとれないという事情による。

彗星のスペクトルは次の 3 成分よりなる。すなわち、分子のエミッション・バンド、連続スペクトル、原子の輝線。

フラウンホーファー線を示す連続スペクトルは核で最も強く、核では常にみえている。核以外では比較的弱く、尾では特に弱い。

原子の輝線は彗星が太陽に通常 0.7 天文単位以内に近づくと現われる。大部分の彗星では Na の D 線だけがみえるが、特に太陽に近づいた彗星では Fe, Ni, 等の金属の輝線もみえる。最近、彗星の紫外スペクトルが大気外から観測された。観測衛星 OAO-2 は多胡一佐藤一小坂彗星に異常に強い水素のライマン- α の輝線を観測した。そして輝線を出していた領域は分子帯のみえていた領域よりはるかに広がったということである。詳細はなお不明だが、可視域にある水素のバルマー線が彗星に輝線としてみえたことは一度もない。

彗星スペクトルの特長は分子のエミッション・バンドにある。分子帯は太陽から遠いと弱く、また太陽に非常に近づくと太陽の反射光である連続光にかくされて、かえって弱くみえる。分子帯の種類は頭と尾で異なる。頭にみえている分子は

CN, C₂, C₃, CH, NH₂, OH, NH

などの中性分子である。連続光が弱い場合、目でみた彗星の明るさは大部分 C₂ のスワン帯によるものであり、写真に撮った彗星の明るさの大部分は CN によるものである。他方、尾に見えているのは、

CO⁺, N₂⁺, CH⁺, OH⁺, CO₂⁺

などの分子イオンである。CO⁺, N₂⁺ 等は核の近傍でもみられ、爆発的に明るくなる現象をとまう。その時間

* 東大理学部 天文学教室
Y. Yamashita: Cometary Spectra.

変化をみていると、これらの分子が核の近くで電離して、太陽風にそって尾の方へ流されるようすがよくわかる。

各分子帯の強度と彗星の太陽からの距離とのあいだには次のような関係がある。

3 天文単位以上; スペクトルは太陽の反射光。

約 3 天文単位; CN が現われ同時に頭が形成される。例外的には 1 天文単位以下でも連続光しか示さないものもある。

約 2 天文単位; C_2 , NH_2 が現われる。 C_2/CN の比は約 1.5 天文単位で極大になる。

約 1.8 天文単位; C_2 のスワン帯が現われる。

約 1.5 天文単位; OH, NH, CH が現われる。尾が発生し、より太陽に近づくと急速に発達する。

このような分子帯の特長は典型的彗星についてであって、もちろん例外はいくらでもある。

3. 分子帯の発光機構

低分散分光器でみると、分子のスペクトルは長波長側あるいは短波長側に弱まっていくいくつかの光の帯(バンド)からなっている。これは分子の振動構造によるものである。より高分散の分光器でみると、個々のバンドは規則正しく並んだ多数の線の集合よりなる。このスペクトルの微細構造は分子の回転構造による。

このような分子スペクトルの構造を頭に入れて彗星のスペクトルのエミッション・バンドをみると、回転線の強さは一様ではなく、太陽スペクトルの吸収線に相当する波長のところだけ弱くなっている。この現象は 1941 年シングスによって研究されたので、シングス効果とよばれている。

シングス効果は次のように考えると理解される。すなわち、彗星のエミッション・バンドは彗星大気中の分子が太陽の光に照らされて上の準位に励起され、引き続いて自発遷移によって下の準位に落ちる過程で光っている。ここで下の準位は励起前の元の準位のこともあるし、また、その近傍の異なった振動準位、異なった回転準位のこともある。しかし光をともなう遷移には選択律というものがあって、極く限られた準位間の遷移しか実際には起らないものである。もし自発遷移が励起前の準位に限られていると、吸収線の影響はそのまま回転線の強度に現われる。なぜなら、分子を励起している太陽光に吸収線があると、その波長で励起が十分に行なわれないからである。実際には分子の性質によって数個の準位への遷移が可能であるが、なお吸収線の影響は回転線の強度を弱めるように働く。

スリットの長さを十分長くし、その中央に核をおいてスペクトルを撮ると、核の両側で回転線の相対強度が異なることがしばしば起こる。これをグリーンシュタイン効果という。この現象は彗星大気に自転あるいは膨張が

あると、核の両側で対太陽速度が異なり、したがってシングス効果が異なるということで理解される。すなわち、グリーンシュタイン効果はシングス効果と彗星大気の内部運動を実証したことになる。

4. 分子の励起機構

シングス効果の他にも彗星スペクトルの分子帯は実験室の光源とは異なるいくつかの特長を示す。例えば CN。実験室光源では (0, 0), (1, 1), (2, 2) といったいくつかの振動帯が現われるが、彗星スペクトルでは (0, 0) バンドのみが強く現われる。また回転線についても、彗星スペクトルでは低い準位からの線のみがみえている。このような例は CH, OH, NH にもみられる。このような特長は温度という言葉を用いてあらわすと、太陽から 1 天文単位の距離で CN, CH 等の振動温度および回転温度は約 300°K だということである。それに反して C_2 のスワン帯は実験室のそれと比べてほぼ同じような強度分布を示す。すなわち、 C_2 の振動温度、回転温度は約 6,000°K である。

分子によって励起のされ方が違うという特長は次のように考えると理解される。彗星の大気では密度が非常に小さいので衝突による励起は無視できる位少ない。したがって分子の励起状態は太陽の輻射によって励起され、それが自発遷移によって下の準位に落ちるといったサイクルによって決まる。このような状況における励起状態を記述するのに惑星状星雲など稀薄天体に適用されている理論がある。太陽の輻射場における分子の振動あるいは回転励起の問題にこの理論を応用すると次のようになる。CN, CH など異核二原子分子は双極子能率をもっている。したがって双極子輻射によって振動準位間、あるいは回転準位間の遷移が可能である。このような場合には、励起温度は稀釈された太陽輻射の温度 (1 天文単位の距離で約 300°K) になる。他方 C_2 は等核分子でその対称性のゆえに双極子能率をもたない。したがって振動準位間あるいは回転準位間の遷移は四重極輻射をともなっているのみ可能である。しかし一般に四重極遷移の確率は双極遷移の確率よりはるかに小さいという性質がある。このような場合には振動準位間あるいは回転準位間の励起温度は太陽輻射の色温度 (約 6,000°K) そのものになる。

今まで便宜上、発光機構と励起機構とを分けて述べたが、これらは結局同じものである。すなわち、分子の励起状態と同時に分子帯強度を計算しなければならない。このような計算は電子計算機にたよるしかないが、すでに C_2 , CN についてはくわしい計算が行なわれ、観測された分子帯強度とよく一致することが確かめられている。

5. 分子の解離および電離機構

上に述べた事柄はすでによくわかっていることであるがそのあとのことになると途端にほとんどわからなくな

る。C₂, CN, CHなどは遊離基とよばれ、それ自身では安定な分子であるが化学的には非常に反応しやすい性質をもっている。したがって遊離基はそのままの形で彗星の核の中に存在し得ない。遊離基の一生はほぼ次のようなものであると考えられている。即ち、核の中にあるときは、親分子とよばれる安定な分子として存在する。太陽光によって核から蒸発した親分子は何らかの過程により解離して遊離基となり、光ってみえる。遊離基はさらに何らかの過程により解離して原子になるか、電離してイオンとなり、ついには彗星大気を去る。不思議なのは親分子および娘分子である遊離基の寿命である。分子帯強度の頭における空間分布を調べると、それぞれの分子の寿命がわかる。それによると娘分子の寿命は10⁴~10⁵秒であるのに、親分子の寿命は10²~10³秒と非常に短い。なぜ安定な親分子の方が短命なのであろうか。

親分子の解離が高エネルギー粒子との衝突解離だとすると、太陽風に観測されるそれら粒子の密度より親分子の寿命は10³時間となり長すぎる。また数十種にのぼる親分子の候補について光解離の確率を調べた実験によると、すべての候補の寿命は数時間あるいはそれ以上である。そもそも親分子とは何であるのか。特にC₃の親は正常な化学組成を考える限り、グラファイトであるはずがな

い。実験室では親分子が、一旦バラバラにこわれて、しかる後C原子3個がくっついてC₃ができています。もし彗星大気の密度が十分大きいとしても、酸素過多の状況下では実験室でみられるような反応が起こるはずがない。

分子の電離はさらに奇妙である。前にも述べたように分子イオンのエミッション・バンドは核の近傍にもみえることがあるが、その範囲は半径500km以内に限定されている。通常、分子イオン帯が現われると、それにとまって新しいハローの発達のみられる。その発達に要する時間は100秒あるいはそれ以下ということである。このことは親分子の解離と電離が同時に起こっていることおよびそこでは毎秒10²⁹個のイオンが作られつつあることを示している。このイオン発生率は太陽のUV放射による光電離、高エネルギー電子または陽子による衝突電離、衝撃波による熱電離のいずれによっても説明できないほど高いものである。さらに新しいハローあるいは尾の発達には外界の影響はない。すなわち太陽フレアによるUV放射の増加あるいは微粒子放射の増加とは関係がないということである。このようなことから親分子のうちからイオンになる性質が具わっているのかも知れない。彗星大気の電離については木村博氏のくわしい解説が本誌59巻2月号30頁にあるのでぜひ参照されたい。

天体写真の写し方

小型カメラ・小望遠鏡による天体写真の撮影 藤井旭編著

天体写真は、特別の用意をしなくても、魅惑あふれる夜空を写せ、楽しむことが出来ます。本書は、『天文ガイド』の読者の実際の作例を示しながら、対象についてどんな方法で写せばよいのか。現象やプリントでは、どの点に注意すればよいかなど、わかりやすく解説したやさしい入門書。

■A5変型判・256頁・定価450円好評発売中！

広角レンズによる星野写真集

好評をいただいた『望遠レンズによる星野写真集』の姉妹編。小型カメラの特徴を生かし、とくに広角レンズによる星野の楽しみ方を紹介しました。星座・星雲・星団をはじめ、銀河まで、カラー4枚、モノクローム117枚を収録した。

■B5変型判・128頁

天文ガイド別冊 550円 好評発売中

誠文堂新光社
東京・神田錦町1-5/振替東京6294