

彗星大気の電離について

木村 博*

彗星の構成部分は一一般に核 (Nucleus) と頭部 (Head) と尾 (Tail) の3つに分けられる。尾には2種類あって、ひとつは分子イオン (CO^+ , N_2^+ , CO_2^+) から成る “Type I の尾” と呼ばれるものであり、もうひとつは固体微粒子から成る尾で “Type II の尾” と呼ばれる。核は直接は見えないけれども、不純物を含んだ氷塊であろうと推測されている。核はいわば彗星の本体であってもちろんすべての彗星に共通に存在する。頭部は核のまわりに球状に広がる中性分子 (及び原子) の雲であり殆んどすべての彗星にあらわれる。(発達した Type I の尾をもつ彗星では中性分子が認められない場合もある。例えば Morehouse 彗星 1908 III.) これに反して尾はごく明るい彗星にだけ見られるもので、暗い彗星は一般に尾をもたない。尾を示す彗星のうち約半分が Type I の尾をもち、なかには Type II の尾をあわせもつものもある。(例えば Mrkos 彗星 1957 d).

ところで電離が問題となるのは主として Type I の尾をもつ彗星であるから、以下はその種の彗星に話を限ることにしよう。もちろんその他の彗星は、それらが何故電離現象を伴わないかという形で電離の問題にかかわっている。

彗星の大気は太陽に近づくにつれて発達する。普通まず太陽までの距離 $r=3\sim 2.5$ A. U. から中性分子の発光がはじまって頭部が成長してゆき、 $r\approx 1.5$ A. U. で尾が出現する。(但し CO^+ イオンの強い彗星では $r=2.5\sim 2$ A. U. ですでに尾があらわれる。例えば前出の Morehouse 彗星。) r の減少に伴う尾の明るさの増大は頭部のそれよりも著しい。頭部を形づくる中性分子は CN, C_2 , C, NH, OH, NH_2 , CH などであり、他に Na, [OI], Fe, Ni の原子スペクトルも観測されている。一方 Type I の尾を形づくるものは分子イオン CO^+ , N_2^+ , CO_2^+ , CH^+ である。これらの発光はすべて太陽光で励起されて起る、すなわち蛍光機構によると考えて良いらしい。(唯一の例外は酸素原子の禁制線であるが、これについての解釈はまだ確定していない。)

電離の問題の困難は、 CO^+ や N_2^+ イオンが核の近傍で生じて加速され (恐らく磁力線に沿って) 尾に流れていくのに対して、 C_2 や CN のような中性分子が核から極めて遠方まで、解離や電離を殆んど受けずに拡がって行けるという点にある。その事情をもう少し具体的に、

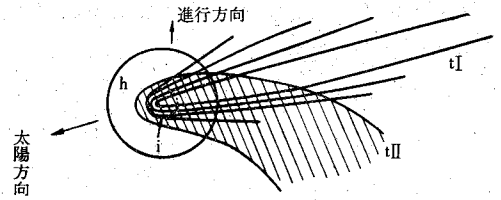


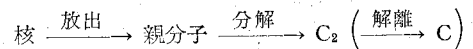
図1 h: 頭部; 半径 $\approx 10^5\sim 10^6$ km
i: イオン生成領域; 半径 $\approx 5\times 10^3\sim 10^4$ km
tI: type I の尾; (長さ $\approx 10^5\sim 10^7$ km, 幅 $\approx 10^5$ km)
tII: type II の尾

$r=1$ A. U. 附近での標準的な (Type I の尾をもつ) 彗星について調べてみよう。全体的な形を単純化して図1に示しておく。

まず頭部の中性分子のふるまいについて考えておこう。代表として C_2 分子をとる。 C_2 分子が核から等方的に放出されて一様な速度 v_0 で拡がっていくとすると、その密度分布 $N(R)$ は核からの距離 R の平方に反比例する。 C_2 分子は運動の過程で太陽からの光による解離 (または電離) によって失われるから、その補正を加えれば密度分布を

$$N(R) = KR^{-2} e^{-R/R_0}$$

の形に書くことができる。但し $R_0 = v_0 \tau_0$, τ_0 は解離までの平均寿命, K は定数。しかし観測される発光強度分布を説明するためには更に次のような事情を考慮する必要があるらしい。すなわち、 C_2 分子は核から直接出てくるわけではなく、むしろ



のような2段の過程を経て生ずると考えるのがよいらしい。親分子の寿命を τ_1 , その膨脹速度を v_1 と書けば、この場合の密度分布は、

$$N(R) = KR^{-2} (e^{-R/R_0} - e^{-R/R_1})$$

で与えられる。ここで $R_1 = v_1 \tau_1$ 。この密度分布は、(R_0/R_1) の値を 10 程度にとつてやれば、発光強度分布をよく説明することができる。 $R_1 = 0.1 R_0$ であれば、頭部の外側のほうの強度分布は R_1 によらず R_0 だけで決まるから観測から R_0 を求めると $r=1$ A. U. で $R_0 \approx 10^5$ km が得られる。従つて $R_1 \approx 10^4$ km。(これはイオン生成領域の拡がりにはほぼ等しい。) ここで $v_0 \approx v_1 \approx 1$ km/sec を仮定すれば、(註1) $\tau_0 \approx 10^5$ sec, $\tau_1 \approx 10^4$ sec, となる。

次に分子イオンについて、これも代表的な CO^+ イオ

* 東大教養

H. Kimura; On the Ionization of the Atmosphere of Comets.

ンをとって考えることにしよう。(N₂⁺イオンのふるまいはCO⁺に似ている。CO₂⁺やCH⁺イオンは空間的な拡がり小さく、発光も弱い。)分子イオンは図1に示したように、頭部の拡がりの1/10程度の小さな領域で生成されて尾の方に流れていくように見える。分子イオンの発生によって観測されるType Iの尾は、全体として直線的に反太陽方向に伸びているが、その中には磁場の存在を示唆するような様々な模様が見られ、しかもかなり激しい時間変化を示す。CO⁺イオンの発光強度(或いは流出量)の時間的な変化から次のような考察によって、CO⁺イオンを生み出す親分子の寿命 $\tau_p(\text{CO}^+)$ を導くことができる。たとえば中性分子COが電離してCO⁺を生ずるとすれば、核からのCOの生成率を $F(t)$ 、核近傍のCOの存在量を $N(t)$ 、CO⁺の尾への流出量を $S(t)$ として、

$$\begin{cases} dN/dt = F(t) - \tau_p^{-1}N(t), \\ S(t) = \tau_p^{-1}N(t), \end{cases}$$

定常状態では $\frac{dN}{dt} = 0$ とおいてやって、

$$S_0 = \tau_p^{-1}N_0 = F_0$$

となる。

或る時刻($t=0$)で突然 $F=0$ になったとすると、その後の $N(t)$ 、 $S(t)$ の減り方は

$$dN/dt = -\tau_p^{-1}N$$

従って、 $N = N_0 e^{-t/\tau_p}$

すなわち、

$$S(t) = S_0 e^{-t/\tau_p}$$

となる。つまり τ_p は流出量が $1/e$ に減るまでの時間尺度に相当し、これは観測的に1時間以下であることがわかっているから

$$\tau_p \leq 10^{3.5} \text{ sec}$$

が得られる。言いかえると、核近傍における τ_p を一定とし、従って F の時間変化を間接的に S の変化を通して見ていると仮定することによって τ_p についての情報が得られたわけである。(Fの変化を極端に激しいものとしたから、 τ_p の値としてはその上限が与えられる。)

このように効率の高いCO⁺生成はどのような機構で起るのだろうか。まず考えられるのは中性分子COの太陽光による光電離、或いは、太陽からのエネルギー粒子との電荷交換反応であるが、いずれも量的に不足するようである。太陽光球からの輻射によると $\tau_p(\text{CO}^+) \approx 10^{3.5}$ secであり、彩層やコロナからの紫外輻射の寄与を考慮しても τ_p の値は2桁くらいしか小さくならない。エネルギー粒子の強度については或る程度あいまいさが残っていることや、時間的な変化の巾が大きいことから、電荷交換反応でCO⁺の生成を説明するに十分な粒子束強度もあり得る、という見解も出されていた。しかし粒子流の

強度が大きいとC₂やCNなどの分子の寿命に影響してくるから、 $v=10^8$ cm/sec、 $n_p=n_e=10$ cm⁻³程度より強い粒子流は考えにくい。(註2)この場合には、電荷交換反応 $\text{H}^+ + \text{CO} \rightarrow \text{H} + \text{CO}^+$ の反応断面積 $\sigma \approx 3 \times 10^{-15}$ cm²を使って、 τ_p は、 $\tau_p(\text{CO}^+) = (nv\sigma)^{-1} \approx 3 \times 10^5$ secとなり、やはり十分な電離は期待されない。

そのうえ更に、光電離や電荷交換は太陽輻射という外的要因に強く支配される機構であるから、C₂やCNのような頭部に見られる中性分子のグループと、イオンとしてのみ観測されるCOやN₂のような分子のグループとの区別が何故生ずるのか、も理解し難い。電離ポテンシャルや電子状態には、グループ分けを可能にするようなはっきりした差異があると思われなければならない。CO、N₂、CO₂は残念ながら中性分子のままでは可視域に適当な発光帯をもたない。従って分布状況がわかっていない。しかしそれらが、他の中性分子C₂やCNなどと似た分布を示し、太陽からの輻射で電離するとすれば、分子イオンCO⁺やN₂⁺は頭部全体から尾に流れ出ていく筈だという疑問が生ずる。イオンは核の近傍のごく限られた領域からしか流出していないのである。或いはすでに述べたようにC₂分子は核から或る程度離れた所で生成されるに対して、COは核から直接に放出されるのだと考えても、寿命の2桁のちがいは、太陽輻射の強度が核の近傍と外側の領域とで2桁程度ちがっているのではない限りやはり説明できない。

そこで結局、核の近傍の密度の高い領域で複雑な諸種の反応が起っている可能性を考えることが必要になってくると思われる。

CO⁺イオンなどが分子同志の衝突反応の過程で生れるとすれば、イオン生成の確率は分子密度に強く依存することになり、密度の高い核近傍でのみイオン生成が行なわれるという事情を定性的には理解できる。この領域から抜け出した分子の電離や解離は、太陽からの輻射によってゆっくりと行なわれることになる。

しかし具体的な反応機構の解明はこれからの問題であって、中性分子グループとイオングループのちがいの原因などについてはまだ何も言うことができない。問題は先のほうに押しやられただけだともいえる。中性分子COなどの存在を前提して太陽輻射による電離を考えるのは不適当だ、とわかったにすぎないから。

もちろん太陽までの距離の減少に伴うType Iの尾の明るさの増大が、頭部の中性分子のそれよりも急であることや、Type Iの尾の明るさと太陽活動との相関がかなりはっきりしてきたことなどを考えると、太陽からの輻射が彗星大気のイオン生成に一役買っていることは否定できない。おそらく太陽からの輻射は直接に電離の原