

ハレー彗星の物理と化学

清水 幹 夫*

1. はじめに

彗星の本体である彗星核は汚れた氷であり、太陽に近づいた時熱せられた表面からガスと塵を吹き散らし、観測にかかるようになる。とすれば必然的に地球からの観測時期は夕暮れか夜明け方の短い時間に限られ、高度は低い。こういう悪条件にもかかわらず、その異様で美しい姿は多くの人々を魅惑し、数多くの報告が提出され続けて来た。特にハレー彗星は、周期型彗星で最大のものであるため、1910年の接近の際には天文学に関心の薄い人々の間にすら、衝撃を与えた。

彗星の物理化学過程に対する理解はここ10年の間に大きな進歩を見た。紫外・赤外・電波領域でのデータが、これ迄の可視領域に限られていたアプローチを拡大し、また彗星のかげらを拾うことが可能となってきたため、微量成分にしか迫れなかった時代から、主成分を縦横に試験する時期への飛躍が起ったからである。この辺の事情は既に本誌に書いたことがある(1975年6月号)。この頃の観測対象はベネット、コホーテクといった彗星だが、その後ウエスト、ブラッドフィールドなどの彗星が出現し、紫外衛星も IUE などが飛んで更に解析が進んで来た。ここではハレー彗星探測時に問題となるようなトピックスに焦点を合せて解説を試みることにする。

2. 水素原子コマと Planet-A 観測

現在のところ、彗星が太陽系内のどの地点で形成したか(或いは星間空間で作られたのか)どうかということについての決定的なデータは存在しない。しかし、多くの場合、太陽系の外側の冷たい領域で氷や岩や鉄の塵が集ってできた微惑星が彗星であるという立場がとられているので、ここでも差し当たりそう考える。とすると、宇宙組成でいって水素やヘリウムについて多い酸素の化合物である水が彗星の氷の主成分と考えるのが自然であろう。実際1974年のブラッドフィールド彗星で水分子からのレーザー線が電波観測で検出されている。また水がイオン化してできた H_2O^+ の分子帯が近赤外域で捕っており、その実験室での同定がコホーテク観測時の一つのトピックスであった。一方、この水分子は太陽紫外線によって水素原子 H と水酸基 OH に分解する。これら分解物はそれぞれ 1216 Å と 3060 Å の波長で観測されて

おり、特に前者は核の周り数百万 km にもおよぶ巨大な水素コマを形成していることが知られている。この広がりには、可視光で見るコマより一桁以上大きいものである。観測値から導かれた H と OH の量はほぼ 2:1。H を放出する分子が水以外に大量に核に入っていないから、H が OH から作られることを考慮するとこの事実も水の核成分説を裏書きする。実は日本のハレー探査機 Planet-A はこの水素コマを観測する。そこで上記の過程を少し詳しく掘り下げよう。

まず、彗星から放出される水分子の量(これは太陽からの距離の関数であるので、当分 1 AU における値を問題にする)は彗星によってどう違うであろうか。レーザーから出された値は、励起温度やメカニズムの不明なこと、などのため信用ができないし、赤外の解析も実験室データの不充分さのため未だ余りあてにならない。となると、水素原子の放出量などが良い手がかりになりそうである。この原子が光って見えるのは太陽紫外線中のライマンアルファ光の共鳴散乱という単純なメカニズムによるから解析がすっきりできるのである。そこで H 原子の分布に関し、よく用いられるヘイザーモデル

$$n(r) = Q(R) \frac{e^{-r/\tau}}{r^2}$$

を一応適用して水素原子の生成速度 $Q(R)$ を観測から出す試みが数多くなされてきた。ここに R は太陽から核への距離、 r は核より H 原子迄の距離、 v は H の平均速度、 τ は H の寿命である。この寿命に一番効く過程としては、太陽風中のプロトンと中性の H との電荷交換作用が考えられる。なお $v\tau$ のことをスケールレングスと名付ける。H の場合には v が 10 km s^{-1} 、 τ が 10^6 s のオーダーなので、 $v\tau$ は 10^7 km 程度になる。

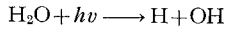
この荒っぽい近似では、1 AU での Q はベネットやタゴ・サトー・コサカといった明るい新しい彗星では、 $10^{30} \text{ 分子} \cdot \text{s}^{-1}$ といった値になる。またエンケのように、何度も太陽の近くをかすめている周期型の古い小さい彗星になると $10^{28} \text{ 分子} \cdot \text{s}^{-1}$ と低くなる。ハレーの場合はダストが多い古い型なので $10^{29} \text{ 分子} \cdot \text{s}^{-1}$ と予想されることが多い。

次に Q の R 依存性はどうか。H の場合、ベネット、コホーテク、エンケなどについて OAO2, OAO3, OGO5, マリナー 10, ロケットなどによる多くの観測が行われ、大体 R^{-2} に近い振舞いをする事が導かれた。太陽光束が同様の振舞いをする事を考えればもっともらしい依

* 宇宙研 Mikio Shimiz: Physico Chemistry of the Comet Halley

存則と思われる。OH に対しても同様の分析がなされ、これも R^{-2} 則に適合することが確かめられて来た。ところが 1979 年に現れたブラッドフィールド彗星については $R^{-3.2}$ という依存則が得られた。この 5 月にオタワで開かれたコスパーの際には、可視光観測からも同様の結果が得られたと報告されていた。彗星表面からの蒸発過程に相当複雑なものがあるということで、やはり自然は一筋縄では片付かない例である。

ところで H の観測が始まった当時から、その速度 v について奇妙な結果が出ていた。



という単純な光分解と考えれば、H の速度は 20km s^{-1} という値が予想されるのに、OAO2 の解析結果では 8

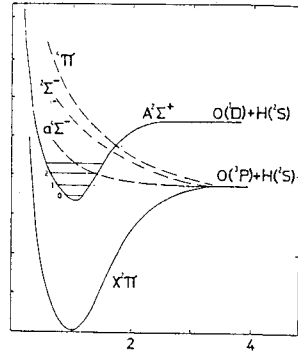


図 2 OH のポテンシャルカーブ。a 状態は X 状態と $v=2$ でクロスし、前期解離を起す。

km s^{-1} ということになってしまったのである。その後 OGO5 の結果の詳細な分析から、やはり 20km s^{-1} の成分もあり、両者の数はほぼ等しそうだということになった。だがその当時、実験室でのデータが不足し、何故水素に遅速両成分が存在するのか説明がつかかねていた。その内、二つの成分が存在することが観測的に確認された。OAO3 (コペルニクス) によって、1975 年のコバヤシ・バーガー・ミロン彗星の光のコマの内外におけるライマンアルファ線巾が測定され、核の近くでは線巾が広く、コマの縁では巾が狭いことが検出されたのである (図 1)。前者が高速成分、後者が低速成分に相当する。ここで全く彗星に素人のスウェーデンの物理屋さん達が登場する。彼らは水の分解物の片割れの一つ OH の前期解離速度を測定した。OH の基底状態 $X^2\Pi$ は図 2 に示すように $\text{O}(^3\text{P}) + \text{H}(^2\text{S})$ から生成する。一方、この組合せからの反撥状態の一つ $a^4\Sigma^-$ は、OH の第一励起状態 $A^2\Sigma^+$ の $v=2$ の振動状態とちょうどクロスする。そこで $X \rightarrow A$ の光励起が約 2600\AA の紫外光の吸収によって起った時、 $v=2$ の状態から前期解離により O と H への分解が起る可能性があり、うまいことに、その時 H は 8km s^{-1} 程度の速度で走り出すのである。早速、測定された解離速度を使って観測値が説明できるかどうかテストされた。コホーテックおよびコバヤシ・バーガー・ミロン彗星の場合についてスケールレンクスから導かれた τ は計算された τ よりいずれも 1.7 倍大きいという結果になった。まあまあ良いというだろうと思われる。

さてこれ迄は、ハイザーモデル近似が一応採用されて来た。これは彗星核から一様に分子がとび出し、互に衝突し合いながら平均として半径方向に拡がり、その外側で紫外光を吸収したり、太陽風と相互作用して次第に消えて行くといった一種の流体近似である。ところで彗星分子の密度は、核の付近でも 10^{11}cm^{-3} と地球で言えば

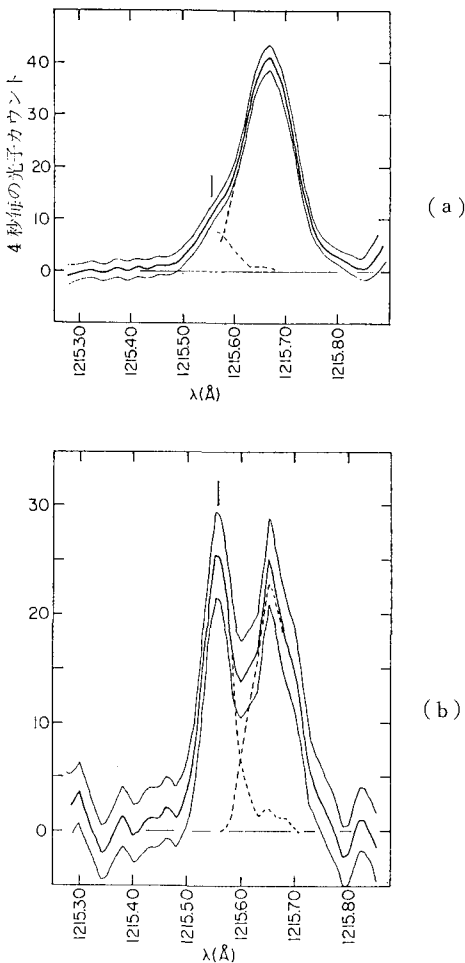


図 1 彗星核の近く (a) と遠く (b) でとったライマンアルファ光のプロファイル。前者の巾は 60m\AA 、後者のそれは 45m\AA 。水素原子の速度にすると、それぞれ 20km/s 、 8km/s に当る。プロファイルの左側には地球のジオコ罗纳線が重っている。(ピークに | 印がある)。

上層大気程度の薄さで、まあ真空中に遠くないといったものである。そこで衝突がひんぱんに起る領域というのは、核から $3 \times 10^4 \text{ km}$ 以内と考えてよい。ところで、観測から求められた H_2O と OH のスケールレングスはそれぞれ 1×10^5 , $2 \times 10^5 \text{ km}$ である。すなわち H_2O と OH の光分解で生じた水素原子はもはや衝突することなく、光吸収の場所から等方的に散らばっていくであろう。この振舞いを核からの半径方向への飛行として捉える訳にはいかない。このことはフランスのフェストーや、アメリカのデルザム達によって指摘され、詳しい調査がなされて来た。モンテカルロ法、多重積分法による計算が行われ得られた分布はやはりヘーザーモデルと違っていると言われる。しかし更に詳しく見ると、彼らの計算にはかなりのゴマカシがある。この点を改め、かつライマンアルファ光の吸収による H の飛跡の変化をも考慮した大規模な計算が筆者の研究室で北村らにより遂行されつつあり、Planet-A のデータ解析に適用される予定である。

H 原子の問題でも一つ重要な問題は多重散乱の効果である。観測された共鳴散乱光の外側の光学的に薄い部分の解析は極めて容易である。ここでは水素原子の密度と、散乱光強度が比例しているし、その比例係数はきちんと出せる。今迄のべて来た解析は皆この範囲のものであった。しかし核に近い密度の高い領域に突入したライマンアルファ光子は、何回も散乱を繰り返した後、再び外へ現われ検出にかかる。この問題は球形の対象に外側から光を当てるといってこれ迄あまり扱わなかった事例であり、一般的な取り扱い形式ができ上がっていない。これ迄ドイツのケラーがモンテカルロ法で解いているが、かなり荒いことをやっており、改良の余地は充分ある。今後に残された重要な課題である。

3. 彗星と太陽系の起源

このように、彗星の水素コマの問題はかなり良く理解される段階に至っており、標準モデルからの外れを手掛かりに、太陽風と彗星の相互作用の様態とか、コマの中のゆらぎなどを検出し、彗星の物理過程への知見を深めることが可能となった。一方、彗星核が原始太陽系星雲中の凝縮ガスと塵の混合体であったとすれば、その解析は当然太陽系形成論や生命の起源諸仮説にも連がっていくだろうという見方がある。この辺の話を概観しよう。

まず揮発性成分であるが、これ迄に安定な中性分子として検出されたものとしては、 H_2O , CO , HCN , CH_3CN が挙げられている。更に分子イオンとして CO_2^+ , N_2^+ , CO^+ が見つかっている。これらの分子の中には、彗星の辿った歴史によって存在度が変わっているのかと思わ

るものがあり典型的なのは CO である。ウエストのように新しい明るい彗星では極めて明瞭に検出されていたのに、最近 IUE がとった暗い周期性彗星群の紫外スペクトル中では CO も CO^+ も消えている。比較的揮発性の高いこの分子が何度も太陽に近づいている間に昇華し切ってしまったのだろうか。 CO は CO_2 から生成したという考え方もある。これが何かからんでいないか。しかし、 CO_2^+ と CO^+ が共に見出された場合、両者は同じくらい強く輝いている。共鳴散乱の振動子強度は前者の方が一桁大きいので、量は後者の方が多い。また中性分子のイオン化の速度はどれも同じようなものだから、結局、 CO_2 は CO より量が少なく、親分子になり難い。紫外観測で C 原子が H 原子の $1/3$ から $1/5$ 程度の量であることが見出されている。 CO が見つかった場合には、その量はちょうど C の量に適合することが確認されている。またその場合 CO が核の近くに見出されていることも、この分子が直接核から飛び出したことの証拠とされる。なお、 C の親分子として CH_4 も考えられるが観測された CH 量が少ないのでその量は上記 2 分子より少ないとされている。

一方、 N を含む分子はどうか。 NH_2 の検出量から推定される NH_3 の量は僅少である。可視部で CN が強く検出されるが、これは HCN や CH_3CN の光分解によることが、 CN の r 分布のようすから山本により結論されている (C_2 , C_3 も同じように C_2H_2 などから生成するようである) し、そうならば、量は少ない。一方 N_2^+ の量は、観測 (一つしか無いのだが) によると CO^+ などよりかなり少なく、その親分子が N_2 であったとしても、核には 1% 程度しか入っていない。これは宇宙組成から期待されるよりずっと少ない。 N_2 が双極子能率を持たず、四重極子能率しかないので、水分子との相互作用が弱く、生成時核の中に取り込み難かったのであろう。 N_2 の凝結温度は $10\text{--}20^\circ\text{K}$ と低く、それ自身では凍り難いのである。結局、窒素は大部分が生成時核に入らなかった可能性が強い。

さてここで彗星の分子群が、星間分子雲中での分子群と良く似ているという事実に目を向けよう。例えば、星間雲中の氷の塵が冷えたままで原始太陽系星雲中の塵へと移行しそのまま固まって彗星核を作ったとすれば、この事実は説明できる。勿論、星間分子の組成は観測的にはすべてつかめていないし、また彗星分子の方にもそれに近い事情があることを承知の上での荒い考え方であるが、ところがこの考え方には太陽系生成理論から言うと、一つまずい点がある。星間雲が分裂し収縮して中心に原子太陽ができた時、猛烈なショックウェイブが走り、原始太陽系星雲は木星付近で何百度もの高温になると言われる。これでは星間塵は一たん蒸発してしまう。

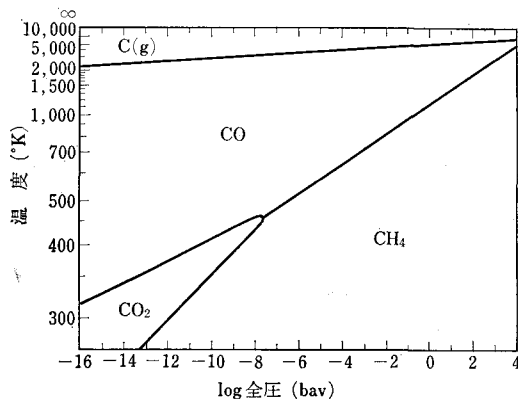


図3 Cを含む分子の原始太陽系星雲中での平衡を示す。実線が各分子の安定領域をへだてている。

この高温説は、地球型惑星や隕石の組成を説明する凝縮説の基本仮定となっており、少なくとも太陽近辺の天体にはよく適合する話である。とすると、この騒ぎが静まり、冷たくなった原始太陽系星雲の外縁部で凍ったガスが彗星に結実したのだろうか。実はこちらの場合にも問題がある。MITのルイスの計算によると、CO₂は原始太陽系星雲のように比較的密度の高い宇宙組成のガス中では平衡状態を仮定する限り存在しない。Cは高温でCO、低温でCH₄としてしか安定でない(図3)。CO₂は平衡論的には星間分子雲程度の濃さで安定になる。CO₂は星間雲中ではイオン分子反応により非平衡的にも生成するという計算もある。何れにしてもCO₂⁺がHCOOHといった大きな有機分子から生成したのでない限り、CO₂は彗星核中に潜んでいると思われるので、どこかに生成源を探さねばならぬのだが。

もうひとつ太陽系の中に彗星生成の化石を探すと、木星族惑星系の衛星が浮び上がってくる。木星衛星のガニメデ、カリスト、土星の衛星群などは比重から言って氷と泥の塊りである。彗星もガスと固体状の塵を1対1くらいに含んでいるから、これらの衛星は彗星が集積成長した気配がある。ついでに言う、小惑星帯の外側の部分を占める炭素質隕石状の小天体群もその一種かも知れぬ。炭素質隕石の水の含有量は20%と言われるが、地上落下直後はもっと多かった可能性があり、その組成は彗星核と遠からずという可能性があるからである。それでは、これら天体の表層上に揮発性成分がどの位存在するか。海王星の大衛星トリトンの大気、冥王星の表面氷にメタンが存在しているのは良く知られている。土星の第6衛星タイタン大気中にも数%くらい存在する。そして興味深いことに、タイタン大気主成分はN₂分子である。これらのガスが地球型惑星と同様に地中からの脱ガスでもたらされたものなら、もとの氷の組成に対する手掛りとなる

う。一つの解釈は原始太陽系星雲中で安定なCH₄、NH₃がとり込まれ、NH₃の光分解でN₂ができたというものである。ところがヴァイキングの電波、赤外データを総合すると、どうもタイタンには12%くらいアルゴンが存在するらしい。これを主成分のN₂量と比べると、ちょうど宇宙組成になっている。そこでSUNYのオーエンなどは、N₂やArが水に付いてそのまま塵の中に取り込まれ、タイタンに入り込んだと考え出している。NH₃を脱ガスさせることの困難が理論的に指摘されたことにもよる。こちらの方は、前述した考え方に近いが、四重極能率程度で本当にH₂Oにひき込まれるかどうかは実験的に示された訳でない。

最後に塵の非揮発性成分だが、飛行機によって集められた惑星間塵(これは彗星の屑と通常考えられている)は分析すると炭素質隕石そのものであり、これではあまりにももっともらしく、太陽系起源論の強い手がかりに成り難い。

4. おわりに

彗星から地球の生命の種がもたらされたという話がある。炭素質隕石中にアミノ酸や核酸塩基が含まれているのは事実である。生命に必要な水も、²⁶Alのような短命の放射性元素が昔あって水を融かせれば作れるという試験もできる。しかし、蛋白質と核酸という生体分子は、単にアミノ酸や塩基の高分子であるというに止まらない。特に核酸は情報分子として機能し、しかも蛋白と有機的に結合して生命を維持する必要がある。更に地球の場合には太陽からの充分なエネルギー流入があり、それでこそ負エントピーを喰わえ込む系が確立できた。彗星上の環境はあまりにも生命の確立にとって悪すぎる。大気の一部を惑星に供給するのが精一杯の役目だったのではないか。

太陽系の起源とからめ出すと、彗星はたいへん役に立った天体だが、謎は依然深い。目下筆者にとって頭の痛いのは、Halleyのようにややすれっからした彗星はCOなどを失って、原始性を保持していないのではないかとことである。多くの探測器やロケット、地球廻り衛星が飛ぶというのに、これはやや残念な話である。とはいえ76年に1回の好機、成果は十分に期待できよう。

訂正

今回発行されました会員名簿中の下記記事を訂正致します(庶務理事)

巻末 V. 日本天文学会役員氏名

誤 昭和54年8月現在

正 昭和57年8月現在