

最近の彗星大気研究

清水 幹 夫*

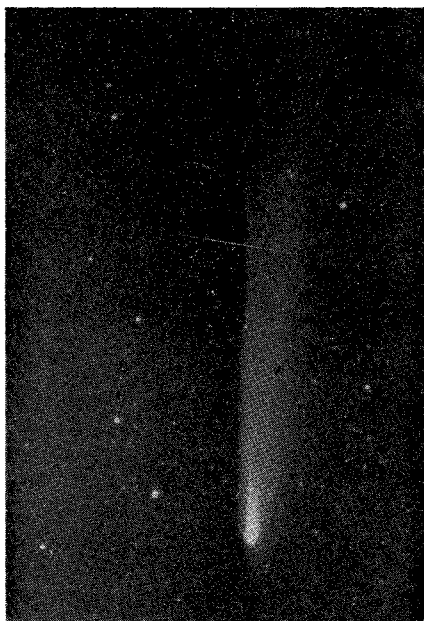


図 1 宇宙研鹿児島空間観測所で撮影されたコホーテク彗星。流星が彗星の尾を横切っている。

1. はじめに—コホーテク観測前後

1968 年末紫外天文衛星 OAO 2 号は地球を旋回する軌道にのった。直後、おおよくタゴ・サトー・コサカ彗星 (1969 g) およびベネット彗星 (1969 i) が天空の一角に出現、OAO はただちにその分光計をこの二大彗星へ向けた。得られたスペクトルの長波長側 (2400-4000 Å) には、これまで可視光観測で確認されていた CN, NH などの発光帯が記録されていた。と同時にその短波長側 (1000-1800 Å) には、H 原子と OH 分子の極めて強い紫外光が検出された (図 2)。H 原子は彗星核の囲りに実に太陽半径の半分くらいの規模で拡がっていた。解析の結果、OH の量は CN 量の 200 倍を超えることも判った。昔から彗星核はいろいろの揮発成分や塵を含んだ氷ではないかとされていた。そこでこれら水と関連する原子分子の観測は、彗星核の主成分に対する画期的業績と評価された。

次いで 1973 年に出現したコホーテク彗星 (1973 f) は、

* 東京大学宇宙航空研究所
Mikio Shimizu, Advances in the Study of Cometary Atmospheres

OAO の発見に士気を鼓舞された彗星観測陣にとっては絶好の目標となった。その発見時期が早かったため観測準備に十分な時間が割けたという利点もあった。光学観測に、紫外ロケットの打上げ、高精度の赤外観測、電波望遠鏡での探測が加わり、この彗星は直後に現れたブラッドフィールド彗星 (1974 b) と共に徹底的に調べ上げられた。

まず感度の良くなった近赤外域 (6000-7000 Å) の乾板上にたくさんの未同定帯が発見された。アメリカとドイツのデータは直ちにこの分野の最高権威であるカナダの NRL に送られ、分子種の同定が求められた。まさにちょうどその時期、NRL では H_2O^+ 分子の吸収帯の検出に成功しており、彗星の運動を考慮すれば、両者の位置は寸分の狂いもなく合致した。水が主成分であることは一層確実になった。一方、電波分光天文学者達はどんな分子が存在するかという定性的検出力において大へん強い。彼等は彗星が太陽に近い電波望遠鏡が熱で曲り易いという難点を、ドームをかぶせたまま観測するという苦心を払って克服し、 CH_3CN , CH , OH といった分子の検出に次々と成功した。紫外ロケット群や、OSO 5 号などの衛星は、H 原子のライマンアルファ線の定量観測を中心にデータを積み上げた。その他に目立ったのは、1600 Å 付近にある二本のかなり強い C 原子線の発見に関する速報であった。

とびかう情報を整理し討論するため、IAU 主催のコロキアムが去年の 10 月末、ワシントン郊外のゴダード研究所で開かれた。参加者百数十人、各分野のレビュアー、

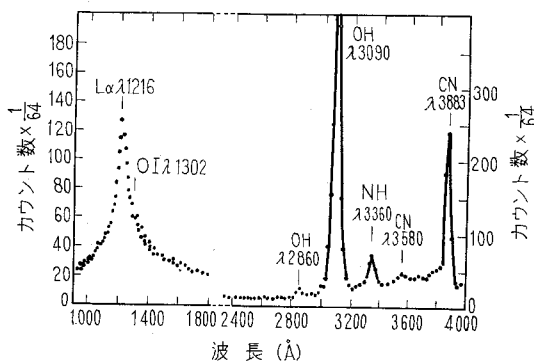


図 2 OAO 2 号でとられたベネット彗星の紫外スペクトル。1600 Å 辺に 2 つのこぶが出ているのに注意。後にこれが C 原子スペクトルと判った。

新しい問題提起をした論文, それに対する議論だけに限りながら, なお5日間ぎっしりのスケジュールという熱のこもった会であった. 全く新しい視野が開かれた時期だけに研究者の反応もたいへん生き生きしていた. この学会あたりを軸として彗星研究の流れは大きく転回し始めた感がある.

2. 彗星大気データのIAU コロキアムを中心に

新しい知見に対比させるためにも, これ迄地上からの可視域観測で彗星揮発成分について判っていた事柄をまずまとめておこう. 彗星の本体は核と呼ばれる半径数kmの種々の成分を含む“汚水”である. 太陽に近づくと, その熱を受けて蒸発し, ガスが毎秒1kmぐらいの速さで拡がり, 核を 10^5 kmぐらいのコマと呼ばれるガス球で包むようになる. また核のごく近くで形成されるらしいプラズマが, 太陽風に流されて, 太陽と反対の方向に0.1天文単位ぐらいの尾をひく(も一つの塵の尾については, 本誌向井正氏の解説を参照). 通常地上観測では可視域にたまたま発光帯を持つ分子だけが観測できる. コマには早くから C_2 , CN が検出された, それに続いて C_3 , NH , NH_2 , CH , OH も見つかっている. またプラズマの尾が光るのは, 主として CO^+ , さらに N_2^+ , CO_2^+ , OH^+ , CH^+ が太陽光線を共鳴反射するためである. 彗星から放出されるガスの量は C_2 , CN などについては毎秒 10^{27-28} 分子ほど. これは密度でいうと, 彗星核付近で1立方センチ当たり 10^{10} 分子ぐらいに相当する. しかし, これらの分子の高分解スペクトルをよく調べると, もっと濃いガス中にしか見られないような分子間衝突の影響が現れている. これは主成分のガスとして別の分子があることを示唆する. これが水なら, H や OH の紫外データからいって, 密度はもう2桁ぐらい上る. このくらい濃ければ, 木星の衛星のイオやガニメドの大気と同じくらいになり, 彗星の“大気”と呼べよう.

さて, この彗星大気温度に対しては, どのくらい手掛りがあるだろうか. スペクトルから回転準位分布を求め, 回転温度に換算することは, いろいろな分子に対して行われている. 太陽から1天文単位ぐらいの距離で, $300^\circ K$ ぐらいの値がでることが多い. しかし彗星分子はだいたい大きな電気双極子モーメントを持っているため, 太陽輻射の影響が強く効き, 準位分布は衝突によって支配されていない. そこでこの回転温度は, 通常の(運動学的)温度の良い指標になっているとは限らない. もう一つの方法は, 前述したスペクトルに現われる分子間衝突の影響を精密に検討し, 温度を出すやり方である. この場合もたまたま $300^\circ K$ という同じくらいの値になった.

これ迄に観測された分子は, 皆不安定なラジカルやイ

表1 コホーテク彗星(1973f)での分子放出率(分子/秒)0.34天文単位の値で比較

紫外観測		赤外観測	
H	3.6×10^{29}	CH_4	$< 1.0 \times 10^{29}$
O	1.4	H_2	僅小
C	1.2	D	H原子の1/100以下
CO	< 2.7		
H_2	< 0.3	電波観測	
CO_2	< 10.1	H_2O	$10^{34}?$
OH	0.8	CH_3CN	$10^{40}?$
		HCN	$3-12 \times 10^{27}$
		NH_3	$< 5 \times 10^{28}$

オンの形をしている. そこで何か親分子があって, それが紫外線で壊れた後の様子を観測しているのだと思われてきた. 今回のコロキアムでとうとう電波領域においての3種の親分子の発見が報告された. 一つは前述の CH_3CN , もう一つは速報的に流れていたが確認されていなかったHCN, そして最後は主成分そのものズバリの H_2O である. ただし観測データから導出されたガス放出量(表1)は, 励起温度, メーカー効果など未知のパラメータを含むためあまり意味がない. この他2種の未同定線(86.247GHz, SiOの高振動状態?; 8.188GHz, $NH_2?$)の発見も報告されている.

量的な, しかも主成分についての, 観測に成功したのはやはり紫外域である. 水が壊れてできた H , O , OH , 水と同じくらいの量に達する炭素化合物から生じた C などに関しては, ガス放出量の測定結果がたくさん発表された(表1). まず H 原子については1天文単位の距離で, ベネットで毎秒 5×10^{29} 分子, タゴ・サトー・コサカやコホーテクではその半分, エンケでは百分の1. 太陽からの距離についての依存性はだいたい逆自乗則ということである. この H 原子の速度は, 初期の解析では毎秒8kmといわれていた. しかし, 水がこわれてできた H とするとその速度は毎秒20kmでなければならない. 再解析の結果によると確かに毎秒20kmの成分が半分くらいあっても良いが, 毎秒8kmの成分もいぜん残るとのことであった. 後者に対してはどんな生成メカニズムを考えたらよいだろうか.

一方, 赤外観測も高性能の分光計を飛行機に積んだりして活発にくり拡げられた. 特に中心となったのは, CH_4 の有名な 3μ 帯, およびこの分子の光分解生成物である H_2 の赤外帯であった. またD原子のバルマーアルファ線も狙われた. その結果はいずれもネガティブであり, 上限値のみが得られた(表1: 紫外部での H_2 の上限も参照されたい.). もう一つ赤外分光のテーマとして面白いのは H_2O の 6.3μ , CO の 4.7μ の測定であるが, 充分精度の良い観測が行われなかったのは残念で

表 2 いろいろな彗星で平均した各分子の拡がり。

$n(r) = \frac{e^{-r/a}}{r^2}$ とおいたときの $\log a$ (km) で書いてある。

CN	5.17	CH	4.5
C ₂	4.82	OH	3.4 (or 4.7?)
C ₃	4.6	H	7.3

ある。

原子や分子はやがて電離なり解離なりを起して消滅するから、ある距離までいくと急に密度が減る。表 2 にのせてある値は、減衰が指数函数的であるとした際の減衰距離の対数である。普通の分子は核から 10⁶ km ぐらいの距離に（前述の膨張速度だと 1 日の内に）拡がっていることになる。ところで分子の解離断面積はかなり小さいので、太陽から 1 天文単位ぐらいの距離での紫外線強度では、1 日ではなかなか壊れない。この矛盾は以前から指摘されていて、逃げ手として、太陽風の影響、電磁流体的電子加速効果に伴う電子衝撃解離などが考えられていた。また親分子の解離についてもこの事情は共通している。これに対しては、核の近くでは分子（およびラジカル）は水の碎片の中にとり込まれており、それが溶けた際観測にかかる、したがって親分子というものは考えなくて良いのだという話もあった。今回のコロキウムでは、分子の前期解離を考えるなり、膨張速度が一樣という単純な仮定を止めるなりして解決すべきだという試論が強かった。

彗星のガス放出速度については、それに伴う軌道変化を精密に測定することからも手がかりが得られる。最近のデータは紫外からのデータとだいたいつじつまが合う。更に一步進んで、彗星核の表面の氷は太陽に近づくにつれ一たん殆んど蒸発してしまい、(周期型彗星の場合には)濃度勾配を通じての内部からの供給で再近接するまでに表面が氷でおおわれた状態が恢復するのだというモデルも出された。一方彗星核の回転についてはまだ整理がついていない。

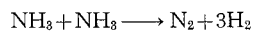
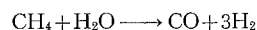
こんなところが IAU コロキウムで発表された彗星大気についての主な観測結果である。

3. 彗星大気中の物理・化学過程—彗星核の本体

彗星は太陽系の天体中で最も揮発性成分に富んでいる。彗星が原始太陽星雲中から生まれたのだとすれば、この成分はまさに原始星雲の状態に対する絶好の手がかりを与える。また彗星が星間空間から捕捉されたのだとしたら、この成分は星間物質の性質を何らかの形で反映している筈である。宇宙組成で多い H や He は極低温 (1~10°K) でしか固化しないから、凝縮過程やその後の放射性元素による加熱効果を考えると彗星核中にはまず

存在しない。可能性は次の CNO 化合物にある。事実 H₂O が主成分であることは確定した。炭素化合物が多量にあることも紫外観測から間違いない。では C や N はどんな形で彗星にとり込まれているのだろうか。昔からいわれているのは水素を相棒にしたメタンとアンモニアである (第 1 種の汚水説)。しかし最近有力になったのは一酸化炭素・窒素 (第 2 種の汚水説) であって、コロキウムの席上でもこの二説はくり返し議論された。この点を述べるには、もう少し細かく彗星大気中の分子過程を議論する必要がある。

これまで CH₄-NH₃ 説の論拠の一つは、CH, NH, NH₂ といった光分解生成物に対応する分子が発見されていることであった。しかしこれらのラジカルの量は、最近確立した水の量に比べると極めて少ない。また、CH₄ は CH₂ と H₂ に光分解するが、この H₂ は一たんできるとなかなか壊れない。そして H₂ の上限は紫外・赤外の両方から非常に低くおさえ込まれている。そこで第 1 種汚水説のさし当てる逃げ道は、彗星大気 (中心から 10~10⁴ km, 典型的密度 10⁸/cc) 中に非常に高温の場所があり

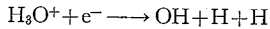


といった変換が起っているとすることである。第 2 種汚水説の一つの根拠は、プラズマの尾に CO⁺, N₂⁺ があるということだが、これは上記の反応の結果であるとする (H₂ の問題は依然残るがこれは無視する外はない)。こうすれば彗星の本体である核はメタン・アンモニアを含む氷から成っていることになる。高温の原因は分子の解離に伴う加熱であるとする。この仮定にもとづいて流体力学的計算がいろいろ行われ、何とか 1 天文単位で数千度 K の温度が出せそうだと結論された。

しかしこれらの計算には重大な見落としがある。彗星大気の主成分である H₂O は良い赤外放射体であるから強力な冷却効果を待つ。このため彗星大気はそう温度が高くなれる筈がない。これを惑星大気との類比で考えてみよう。前述のように彗星大気は核表面で 10¹²/cc ぐらいだが、これは惑星でいえば上層大気の底ぐらいの密度である。惑星上層大気の温度についてはマリナーなどの探測器のデータが豊富にあり、地球に近い金星・火星では 200~400°K ということが判っている。これらの大気の主成分は CO₂ で、H₂O に比べると赤外放射性はずっと弱い筈なのにこの低温である。だから彗星大気は必然的に低温を好む。ただ惑星の場合には重力が大きくて大気が外側に向かって速やかに薄くなっていくのに対し、彗星大気密度は逆自乗型でゆっくり減少する違いがある。このため彗星大気の極めて外側だけはかなり高温になり得るが、この辺では大気密度が薄くて反応が遅いため上述

の推理はいぜん成立しない。

すると第一種の汚水説に対し残された逃げ道は、低温でも反応速度の大きいイオン分子反応で二次的に CO や N₂ を作る可能性である。しかし詳細に検討するとこの可能性も小さいことが判る。ここではこれ迄と逆に、核の中に CO と N₂ が含まれているのだとして、いろいろな分子イオンに対する観測と首尾一貫するかどうかを考えてみよう。図3はその場合どんなイオン分子反応が起るかを示したフローチャートである。電離直後にできたいろいろな分子イオンは結局 H₂O との反応で H₂O⁺ へ変わっていく。このことを端的に裏書きするのが、前に述べた毎秒 8km の H 原子の観測である。



という反応でこの奇妙な H 原子の速度が説明されるからである。(OH の光分解でこの原子ができるという話があったが、この分解断面積は極めて小さい。) ところでもし NH₃ が多量に彗星大気中に含まれているとすると、H₃O⁺ は速やかにこの分子と反応して NH₄⁺ に変わってしまう。しかし NH₄⁺ から生成するのは毎秒 2km の H 分子で全く観測と合わない。

またメタン・アンモニアからできると思われる CH₂, CH₃, NH₂ などのラジカルは CH に比べイオン化ポテンシャルが低い。そこでもし CH₄, NH₃ が多量にあったら、CH⁺ は CH₂⁺ などに速やかに変わって観測されない筈であるがこれは事実と反する。

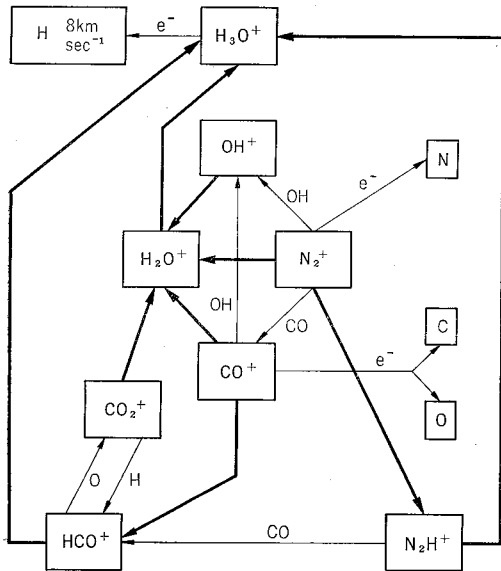


図3 彗星大気中のイオン分子反応。ガスは H₂O, CO, N₂ を含むものと仮定。太い矢印は分子イオンと H₂O との反応に対応、細い矢印はそれ以外の中性分子ないし電子との反応に対応し、相手方の名は細線の横に印してある。

この種の論拠はまだいろいろあるが、ここでは星間分子に関連する議論をも一つだけ挙げるに止めよう。第二種汚水説をとると星間分子と彗星分子の類似性は非常に良い。例えば星間分子雲中の炭素は殆んど CO の形で存在する。その結果 H₃⁺ とのイオン分子反応で HCO⁺ が相当量でき、これは通常 89 GHz の Xogen 線に対応づけられている。ところで最近星間分子雲中に N₂H⁺ の回転線が見出された。この分子イオンの生成機構としては当然 H₃⁺ と N₂ の反応が考えられる。したがって星間分子雲は窒素の大部分を N₂ の形で含んでいることになる。事実星間雲中で今迄発見された NH₃, CN, HCN などの窒素化合物の量は宇宙組成から予想される量の何万分の一なのである。

こうやって眺めていくと、彗星核の中に含まれる C と N は CO, N₂ の形をとっているように思われる。そうだとすると、定量的に導かれた彗星の“電離層”でのイオン分布を 図4 に示す。プラズマ尾(中心より 10⁶~10⁷km)中の CO⁺ 密度は 1cc ぐらいであり、また彗星大気のイオン化が核のごく近くで起るという観測もあり、理論と観測の対応はよい。

4. 彗星の起源—星周彗星と星間彗星

彗星には短周期型と長周期型の二種がある。前者は後者が木星などに捕捉されたものである。長周期彗星は太

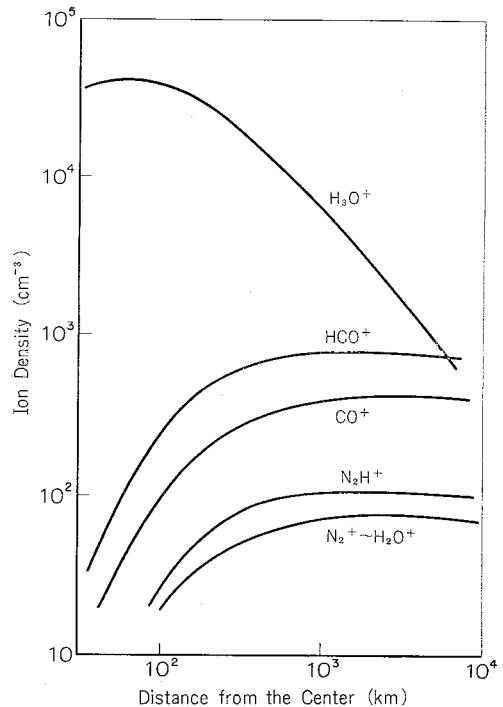


図4 彗星大気中のイオン密度分布。H₂O 60%, CO と N₂ 各 20% として計算されている。

陽系の最外縁（他の星との中間ぐらいの遠方）に等方的に分布し、星や銀河中心などの摂動を受けて太陽近傍へときたま落ちてくる。その軌道は長円のものしか見つかっていないが、それだから太陽系内で生まれたとはいえない。正の運動エネルギーを持つ星間彗星が何らかの摂動で前期の彗星貯蔵地帯に捉まり、それから落ちてくるという可能性も高い。重力ポテンシャルの尾が極めて長く太陽系と星間彗星の衝突断面積が大きいためである。彗星が太陽系内で生成したのか、それとも星間彗星に起因するのか力学的に決定するのが難しいとされるゆえんである。

前節までに述べた彗星揮発成分に関する知見でも、この両者を一義的に区別することはできない。しかしずっと強い制限がつけられ、これは太陽系成因論などにも有用なデータとなる。まず太陽系内生成の立場をとると、これ迄は彗星は木星附近で固まり後に木星の摂動で彗星貯蔵帯にとばされたとしてきた。最近、惑星や隕石などの凝縮温度についての研究が進み、原始太陽星雲中の温度分布が推定されている。これらの結果に合わせると、もし彗星核が第二種の汚氷なら、それが木星軌道辺で凝結するにはやや温度が高すぎ、天王星海王星附近で固まらねばならぬことになる（力学的立場からもうこういう結論が出されたことがある。）。さらに凝縮理論の立場からは、原始太陽星雲は一たん完全にガス化する程高温であったとされる。CO や N₂ といった高温型分子が彗星核中に凝結されていることは、このことに関係あるのかも知れない。

一方、星間分子は新しく星が生まれつつある場所に発見されている。前述のように星間分子組成と彗星ガス組成は似ている (¹²C/¹³C 比も同じ)。そこで太陽系が近傍の星と一しょに生まれつつあったプロトクラスター中の濃い分子雲中に彗星が群成し、原始太陽に他の星の摂動を通じて捉まったとするのも魅力的な考え方である。事実今回のコロキウムでもこういう立場が強調された。

星周彗星や星間彗星についての研究がこのところ華やかになってきた。濃い分子雲の話に限らず、一般の薄い星間雲中でも CNO などが宇宙組成に比べてだいぶ少ないことが OAO 3号の観測によって判ってきて、不足分が小彗星 snow ball の形になっているのではないかという話がある。また星内部の核反応の議論からも、同じように CNO 欠乏彗星—形成説が唱えられている。最近話題の白鳥座にみつかった卵型赤外星雲にともなう彗星雲? の話とか、 γ 線バーストが彗星の中性子星への落下? による話とかも、眉つば的だが上記の傾向に連がっている。力学的に再検討してみると、今迄星間彗星が一つも見出されなかった事実からくる星間彗星の量の上限は星間塵の総量に匹敵する。また太陽系内彗星の総質量も、

これ迄いわれていた地球質量程度ではなくて、太陽質量の 10% にも達すると計算されている。要するに彗星に関しては今迄データが不足し過ぎたのである。

また地球型惑星と彗星の相互作用についても種々言われ出した。月は形成後 6 億年ほど表面を何かで猛烈に叩かれている。月自身の形成物質はたちまち使い切ってしまうので、遠くから隕石や彗星が落ちて来た可能性がある。金星の水・硫黄・塩素なども彗星によって供給されたのではないか。地球史上の種々の出来事も彗星の衝突によって惹き起されたのではないか。さらには生命の発生も彗星中の還元物質に起因していないか。ただ、この最後の説はメタン・アンモニアが無いと駄目になる。

これらの説は Nature や Ap. J. といった雑誌にのったそれぞれ根拠あつての物語である。しかし何といても多少の飛躍を含む。そこで最後に話を前節までのきめ細かい話に戻そう。これからの彗星大気研究の方向はどうなるだろうか。IAU コロキウムで打出されたのは、彗星ミッションと室内彗星分子実験であった。物理・化学の研究がここ迄きた以上もっと近くに寄って細かい構造を調べる必要があり、また議論をするにも分子データ（吸収・発光帯の位置、強度、反応速度など）が完備してなければならぬからである。も一つ重要な方向は空とぶ大望遠鏡 (LST) による紫外・赤外部の観測であろう。これなら彗星進行がなくても彗星大気の構造が出せるかも知れぬ。夢多き彗星天文学を探測器ミッションでぶちこわさないでくれという声もある。将来どこが突破口になるかは別として、彗星大気の構造がいろいろな問題を解く鍵になることはこの節で述べた通りであり、これからの研究の進歩が大いに期待される。

雑報 [I]

ブラッドフィールド彗星 (1975 d) の予報

発見以来南半球だけでしか観測できなかったこの彗星も、光度がいくらか暗くはなったが、北半球に上って来るので、5 月以降の予報を掲載します。

	α	δ	m_1
1975 年 5 月 28 日	6 29.4	-1 45	9.8
6 月 2 日	6 47.1	-0 39	
7	7 04.1	+0 39	10.1
12	7 20.2	+1 40	
17	7 35.6	+2 34	10.5
22	7 50.3	+3 21	
27	8 04.4	+4 2	10.9

(香西)