

# 特集

## C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS)

### は本当に明るくなるの？

鈴木文二（渋谷教育学園幕張中学高校）

#### 1. はじめに

太陽系誕生時の氷型微惑星の名残と考えられる彗星は、始原天体として重要な研究対象である。また、時間スケールの長い天文学において、劇的な見え方の変化や個々の彗星の多様性から、天文愛好家だけでなく一般的な関心を引き起こしてきた。

彗星界が最近賑やかである。7月に起こった12P/Pons-Brooksの急増光、8月にはC/2023 P1 (Nishimura)の発見があった。そして、来年は大物が近づくことが予測されている。C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS)である。しかしながら、「明るい彗星」の到来は何度も喧伝されてきたが、空振りの記憶ばかりが残っているのではないだろうか。非科学的なジンクスが、彗星界で挨拶代わりになっているというほどである。

彗星の光度は、その物理的特性を吟味せずに、観測者の期待が入り込み、明るくなると予測されがちである。

#### 2. 彗星光度の基本知識

彗星の様相は、「汚れた雪玉」に例えられることが多い。正体は氷とダストであるから、それらがどのように発光するかを考えればよい。氷の昇華が彗星活動を支配するため、もっとも重要なのは彗星の日心距離 ( $r$ ) である。また、地球からの観測に影響するのは、彗星の地心距離 ( $\Delta$ ) である。

彗星が  $r=1$  (au)、 $\Delta=1$  (au) にあったときの光度を絶対等級 ( $M$ ) と定義する。絶対等級は、直径の大きな彗星ほど放出される物質が多くなり明るいと考えられるため、彗星

光度のめやすとなる。たとえば、近年でもっとも明るくなったC/1995 O1 (Hale-Bopp)は  $M=-3$  で、その直径は60kmほどであった。

観測される彗星の光度 ( $m$ ) とは、放出されたガスとダストによって作られたコマの明るさをさす。これは、全光度 ( $m_1$ ) とよばれている。多くの彗星核の直径は10km以下であるため、彗星の活動度の低い遠方では、小惑星のような固体表面の反射に近く、この時の光度を核光度 ( $m_2$ ) とよんでいる。

ただし、コマが発生した段階では、光学的に厚い中心部分の数千kmを核光度と誤認してしまうため、 $m_2$ を論議することは有用ではない。

#### 3. 彗星の氷

$r$ に依存するということは、彗星の表面温度 ( $T$ ) に関係するということである。 $T$ が上昇すると氷の蒸発量は増えるが、それによって表面から熱が奪われるため表面温度は下がる。そのため、 $r$ の関数で蒸発平衡を逐次求めていくことになる。しかし、彗星の氷はH<sub>2</sub>Oの氷だけではなく、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>など様々な氷が含まれている。これらの氷が $r$ に依存してどのように昇華していくかを図1に示す。火星軌道以遠ではCO、などが支配的である。多くの彗星の光度の予測は、H<sub>2</sub>Oの昇華が盛んになる距離で正確さを増すとってよい。ただし、氷の組成は彗星ごとに異なることが知られており、H<sub>2</sub>Oにくらべて揮発性の高い氷に富んでいると、太陽に近づいても低い活動に終始してしまうことがある。

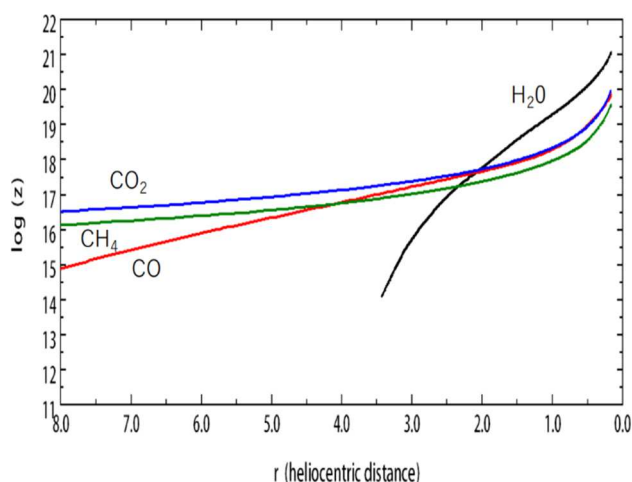


図1 日心距離による氷の昇華量の例

#### 4. 彗星のガス

昇華した氷からはコマを形成するガス成分の母分子が供給される。母分子が太陽光で分解されてラジカル分子となり、主に C2、CN が可視光で観測されるようになる (図 2)。彗星に特有の緑色は、C2 の輝線バンド群である。ラジカル分子は、太陽光の共鳴蛍光散乱で発光しているが、 $r$  が小さくなると寿命が短くなるため、ガスコマの半径、発光強度は複雑に変化する。

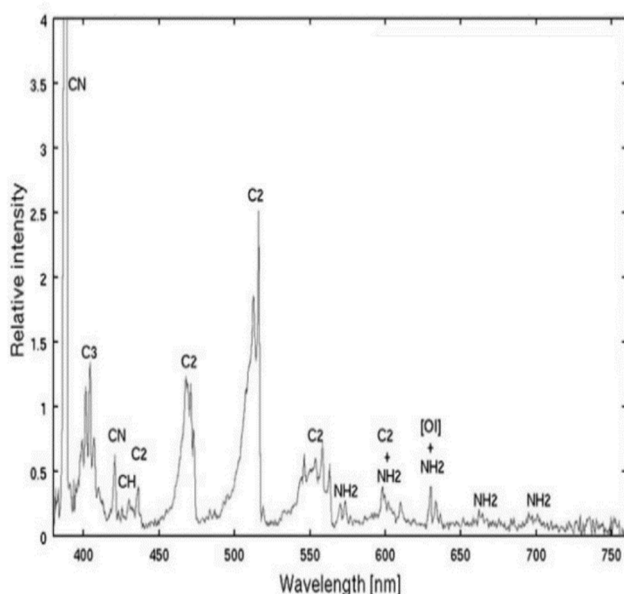


図2 彗星スペクトルの例

#### 5. 彗星のダスト

氷の昇華に伴って雪玉の「汚れ」であるダストが放出される。ダストのほとんどはケイ酸塩であるが、有機物質のダストも検出されている。ダストはコマを形成し、太陽光の散乱によって発光する。ダストの半径は可視光の波長より大きいいため、散乱は Mie 散乱である。一般に、ダストコマが発達した彗星は、明るくなる可能性が高い。「雪の汚れ方」に相当するガスとダストの比は、彗星の光度に密接な関係がある。

#### 6. 彗星核の構造

氷が昇華してガスが拡散していく速度が低いと、ダストが彗星重力圏を脱出することができず、彗星核表面に落下して「ダストマントル」を形成する。この層は熱伝導率が低く、氷の昇華を抑える働きをする。これが、彗星表面の全ての領域から氷の昇華が起こらない理由の一つである。周期彗星では、よく見られる構造である。氷が昇華しやすい特定の領域を活動領域とよぶ。

活動領域は、彗星の軌道面の傾き、自転軸の方向によって、太陽光に照らされる角度が変化する。したがって、彗星の光度変化は近日点に対して必ずしも対照的にはならない。遠方では、揮発性の高い CO などが昇華して新たな活動領域が誕生したり、太陽に近づくと、豊富な H<sub>2</sub>O の昇華とともに活動領域が拡大、あるいは新規に形成されることがある。もちろん、彗星核の分裂によって「フレッシュ」な氷の表面が出現するイベントも起こりうる。

#### 7. 彗星の光度式

以上のような彗星核やコマの物理的な性質は、新しく発見された彗星では、ほとんどのパラメータは未知であり、周期彗星の場合にも詳しく調べられていないことが多い。

一般には、このことを考慮しつつ、以下のよ  
うな「光度式」で、彗星の光度予測を行う  
(図 3)。

$$m = M + 5 \cdot \log(\Delta) + 2.5 \cdot n \cdot \log(r) + S(\theta)$$

M : 絶対等級 ( $\Delta=1, r=1$ )  
 $5 \cdot \log(\Delta)$  : 地心距離の効果  
 $2.5 \cdot n \cdot \log(r)$  : 日心距離の効果  
 (  $2.5 \cdot n = k$  とも表す)  
 $S(\theta)$  : 散乱角  $\theta$  の効果 ( $180 - \theta =$  位相角)

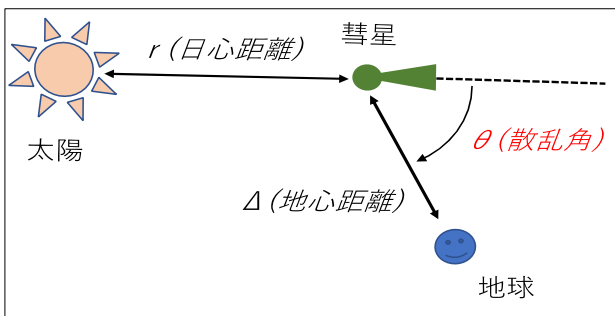


図 3 光度式の幾何学

小惑星のような場合は、(1)式において  $n=2$  である。彗星では、 $n=2\sim 6$  程度の範囲である。すなわち、彗星光度の特徴は  $n$  によって表されると考えてよい。 $S(\theta)$ は、小惑星の場合は表面、彗星の場合にはダストコマによる散乱の効果である(後述)。ただし、活動領域の幾何学的な位置、新たな活動領域の生成などにより、複数の光度式を用いなければならない場合もある。

### 8. Tsuchinshan-ATLAS 彗星の核直径

遠方で発見された例としては、Hale-Bopp 彗星が有名である。この彗星は CO の昇華による活動が見られたのち、順調に H<sub>2</sub>O が活動の中心となっていった。Tsuchinshan-ATLAS 彗星と比較してみよう(図 4)。

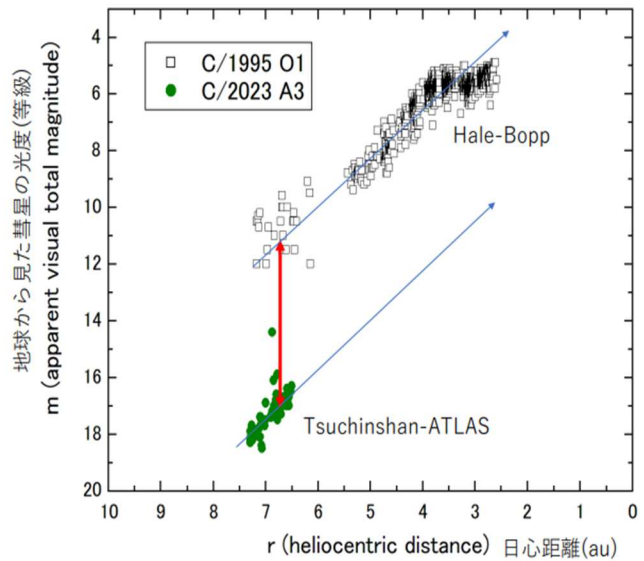


図 4 Hale-Bopp 彗星と Tsuchinshan-ATLAS 彗星の遠方での光度変化

ふたつの彗星の 7au 付近での光度を比較すると、6 等ほどの差が見られる。これが単純に核直径の差を表していると考え、Tsuchinshan-ATLAS 彗星の核直径は、2.4km 程度と予測される。彗星としては小ぶりではあるが、近日点距離は、Hale-Bopp 彗星が 0.89au、Tsuchinshan-ATLAS 彗星は 0.39au であるため、悲観的な最大光度というわけではないだろう。

### 9. Tsuchinshan-ATLAS 彗星の活動度

彗星の光度は、 $n$  に依存することを述べたが、過去の大彗星の  $M, n$  を用いて、Tsuchinshan-ATLAS 彗星の現在の光度にフィットさせてみると、 $M=4.6, n=4.0$  である C/1996 B2 (百武) の光度式によく合うことがわかった(図 5)。

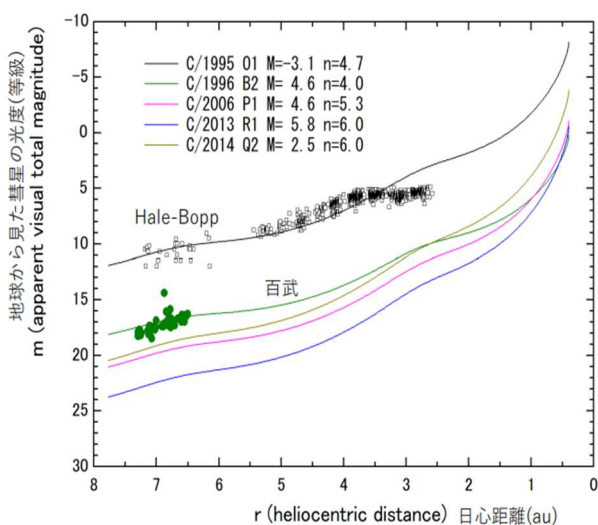


図 5 過去の彗星の光度式フィッティング例

百武彗星の核直径は、2.1km と推定されており、Hale-Bopp 彗星との比較から求めた Tsuchinshan-ATLAS 彗星の 2.4km と大きな矛盾は生じない。そうであれば、この彗星の最大光度は、じゅうぶんに 0 等以上であると予測できる。さらに、百武彗星は、ガスの比率が高かったが、一般的な彗星程度に Tsuchinshan-ATLAS 彗星がダストを放出できると考えると、さらに明るくなる可能性がある。

### 10. 前方散乱効果

この彗星の軌道の特徴として、2024 年 10 月に位相角  $180^\circ$  (散乱角  $0^\circ$ ) となることが知られている。つまり、地球が彗星の真後ろにくることになる。この時に、前方散乱によって、彗星がひととき明るく見える可能性が指摘されている。C/1861 J1、C/2006 P1 (McNaught) がその例である。これは、ダストの Mie 散乱による効果であるので、散乱の粒径パラメータ ( $x$ )、ダストの複素屈折率 ( $i_1, i_2$ ) から、 $\theta$  の関数として以下のように計算することができる (図 6)。

$$x = \pi R / \lambda$$

R : ダストの粒径

$\lambda$  : 波長

$$I(\theta) = \frac{I_0 \lambda^2 (i_1 + i_2)}{8\pi^2 R^2}$$

$I_0$  : 入射光強度

$I(\theta)$  : 散乱角  $\theta$  における強度

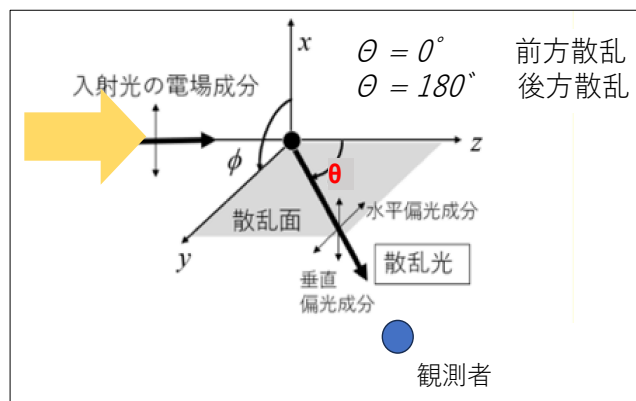


図 6 Mie 散乱の幾何学

典型的な彗星ダストとして、 $x=1.0$ 、 $x=10$  を選び、その複素屈折率を  $i_1=1.55$ 、 $i_2=0.0001$  とすると、可視光 500nm における散乱光強度は、図 7 のようになる。

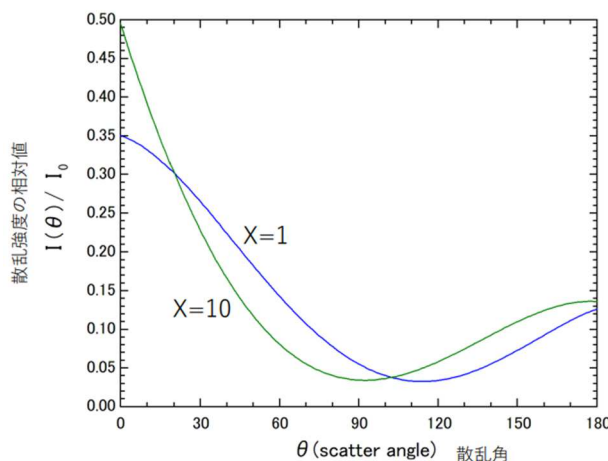


図 7 散乱角  $\theta$  における相対的な散乱光強度

実際に彗星の高度への寄与を考える場合には、 $r$  に依存するダストの生成量  $z(r)$  を見積もらなければならない。ここでは相対量がわ

かればよいと考え、 $r=1.0$  で生成量スケーリングし、 $z(r)=r^{1.5}$  で変化するものとして、見積もってみた (図 8)。

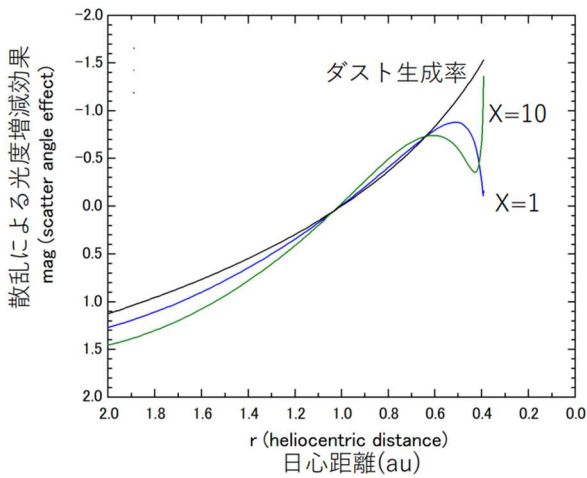


図 8 散乱による光度への寄与の計算例

この結果、前方散乱によって 1 等程度は明るくなること、放出されるダストのサイズによって、効果のようすが異なることがわかる。さらに、この効果を百武彗星の光度式に取り入れて、Tsuchinshan-ATLAS 彗星の最終的な光度予測をしてみよう (図 9)。

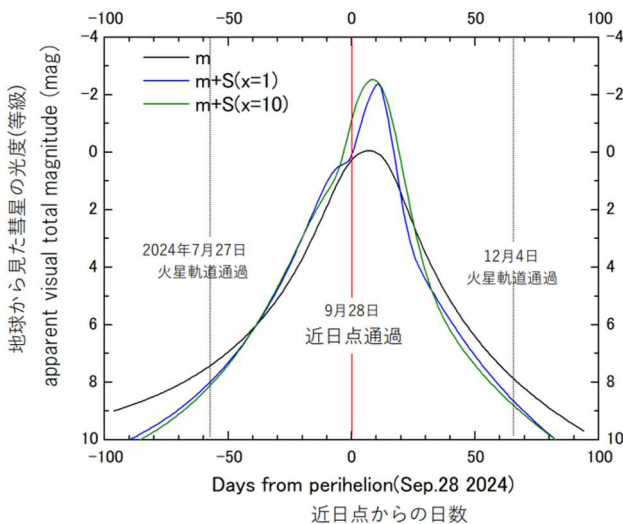


図 9 散乱の効果を検討した、Tsuchinshan-ATLAS 彗星の光度予測

### 11. Tsuchinshan-ATLAS 彗星は明るくなるの？

過去の彗星の観測、および散乱による効果を考慮すると、Tsuchinshan-ATLAS 彗星は最大光度は-2 等程度になることが予測される。ただし、現在 (2023 年 9 月) の彗星は太陽から 5.5au の距離にあり、この距離からの近日点 (0.39au) の彗星光度は、「予測」ではなく、「予想」もしくは「予言」に相当するものと言えらるだろう。彗星は来年 8 月に火星軌道の内側に入り込むため、H<sub>2</sub>O の昇華が顕著となってくるはずである。その時には、この「予言」の一部が正しいかどうか検証されるであろう。

### 文 献

[1] Comet II, 2004, M.C.Festou et al. , Arizona Univ. press  
 [2] 彗星の科学、2013、鈴木文二・秋澤宏樹・菅原賢、恒星社厚生閣  
 [3] Comet Observation database (COBS) : <https://www.cobs.si>