

特集「木星に衝突する彗星：シューメーカー・レビー9」

彗星と木星の衝突の観測について

長谷川 均¹

1. はじめに

1993年4月、我々木星研究者の間ではこの年、国際天文連合(IAU)の世界天文日(World Astronomical Day, WAD)のキャンペーンとして国際木星監視計画(International Jupiter Watch, IJW)が組まれていた。ちょうど、それに合わせたかのように、4月7日に木星に南赤道帯攪乱(South Equatorial Belt Disturbance, SEB Dist.)と呼ばれる、それまで淡化していた帯が急激に復活するという非常に珍しい大気現象が発生した。この計画では観測情報交換のために電子メールによる国際観測メーリングリスト(IJW Mailing List)がJPL(ジェット推進研究所)のOrtonによって準備されていた。このIJWメーリングリストは、攪乱発生前までは、ほとんどメールが流れることもなかったが、攪乱発生後その観測情報の交換でおびた数々のメールが寄せられることとなった。こうして活気付いたメーリングリストを更に活発にさせたのが、今回の1994年7月に予想されているシューメーカー

・レビー第9彗星と木星の衝突についての情報だった。IAUのサーキュラーに衝突の第1報(No. 5800)が流されてからは、それまで木星で非常に珍しい現象であり注目されていた攪乱の情報を凌ぐ勢いで情報が送られてきた。というのも、この世紀の大衝突を観測的に調べようとした場合に、最も有効な手段が、これまで外惑星研究者によって行なわれてきた光から赤外、電波にわたる波長での観測であるからだ。ここでは、この衝突によってどんな観測が可能か、光と赤外観測の立場からガリレオ衛星を通した測光観測と、上層大気に放出された彗星物質の近赤外での観測可能性について報告する。

この彗星の衝突に関する一般的な解説に関して [1] がある。この他、IJWメールでは未発表論文や海外での観測計画など興味深い情報を提供してくれる(現在では宇宙研の惑星科学メーリングリストにも自動的に転送されている)。

問題の衝突の予報であるが、9月15日付のIJWメールの、Chodasによる衝突の予報では、表1のよう

	First	Center	Last
Date (1994)	July 18.41	July 21.21	July 24.01
Jupiter Latitude(deg)	-41.1	-43.9	-46.7
Local Solar Time(deg)	34.1	35.2	36.6
Sun-Comet-Jupiter(deg)	51.3	53.9	56.6
Earth-Jupiter-Comet(deg)	122.2	119.8	117.4

表1. 彗星の衝突の予報

¹(株)アステック

になっている。表中の First は分裂核の先頭が衝突する時刻であり、Last は最後のものである。現在のところ個々の核について予報ができるほど観測が集まっていない。Local Solar Time は衝突地点での地方太陽時を角度で表したものであり、これより衝突が朝側の夜で起こることがわかる。そして分裂した彗星核全部が衝突するには6日ほどかかることになる。

2. 衝突時の火球現象

シューメーカー・レビー彗星の破片と木星大気が起こす最初の現象は火球現象となるだろう。ここでは、筆者らのモデル計算[2]を基にして、その光度変化について紹介したい。これまで、地球大気中で観測された流星や火球、隕石の観測からその発光現象や大気との衝突による力学的振舞について詳しく調べられてきた(例えば、[3])。ここでも、それらのモデルをさらに大きな突入天体に外挿することで木星大気に衝突する彗星が起こすであろう火球現象の推定を試みる。単純な予想でも莫大な光エネルギーが放出されるだろうことが期待できる。

木星重力圏に捕らえられた天体の運動は、木星の軌道面内で木星の中心を原点として以下のように記述することができる。

$$\frac{du}{dt} = \frac{C_D}{2} A \rho_m^{2/3} m^{-1/3} \rho V u - \mu \frac{x}{r^3} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{C_D}{2} A \rho_m^{2/3} m^{-1/3} \rho V v - \mu \frac{y}{r^3} \quad (2)$$

右辺第1項が彗星が木星大気から受ける空気抵抗で、第2項が重力によるものである。ここで、 u , v は速度の x , y 成分、 V は速度の絶対値、 r は彗星の位置ベクトル、 m は彗星の質量、 μ は木星の重力定数、 C_D は抵抗係数、 A は形状因子、 ρ_m は

彗星の密度、 ρ は木星大気の密度である。 C_D の値として1.2、 A の値として2.0を仮定した。この形状因子は、球の場合で約1.2である。彗星核の密度 ρ_m としては、 1.0 g cm^{-3} を仮定した。

木星大気の密度は等温大気を仮定すると、 ρ_0 を基準レベルでの密度として、

$$\rho = \rho_0 \exp(-h/H) \quad (3)$$

と近似することができる。ここで、 h はある基準レベルからの高さであり、 H は、木星大気のスケールハイトで、 $H = RT/m_a g$ によって得ることができる。 R は万有気体定数、 T は温度、 g は重力加速度、 m_a は木星大気の平均分子量(2.3g)である。今回の計算では、 T としてアンモニア雲頂レベルの温度である120Kを仮定した。

彗星核は木星大気分子との激しい衝突により、表面が高温になり、次第に表面から彗星物質が蒸発したり、剥がされたりして質量が減少していく。その程度は、エネルギーフラックスと衝突断面積 S に比例するので、次式のように記述することができる。

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{\Lambda}{2\zeta} S \rho V^3 \quad (4)$$

ここで、 Λ は熱伝達係数で、衝突エネルギーが熱に変換される割合を示す。 ζ は、単位質量あたり蒸発または摩耗に消費されるエネルギーを示す。ここでは、この Λ と ζ をまとめて、 $\sigma = \Lambda/C_D \zeta$ として摩耗係数と呼ぶことにする。この σ の値として、地球で観測された比較的脆い炭素質隕石の値をとって $5.0 \times 10^{-8} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$ を仮定した[4]。この値は氷の気化熱から推定される値に近いものである。これら(1), (2), (4)を適当な質量を初期値として木星大気の外側からスタートすることによって質量

や速度の変化を追跡することが可能になる。計算開始時の彗星の位置は、木星大気の基準レベルから500km上空とし、初速は、予報で出されている60km/sを用いた。60km/sという速度は、地球で言う毎年8月に見られるペルセウス座流星群の相対速度に近いものである。基準レベルは1 barとして、そこを木星の中心からの距離が木星赤道半径となるようにした。衝突による発光は I は、失われる運動エネルギーに発光係数 τ をかけることによって得ることができる。

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{2}{\tau V^2} I \quad (5)$$

この発光係数 τ も地球の流星や火球で観測された値を採用することができる。我々の計算ではVoyagerが木星の裏側で観測した火球の質量を推定する時に用いた $\tau = 5.4 \times 10^6 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-3}$ を採用した[5]。1994年7月に予定されている彗星の衝突

による火球はそれに次ぐ木星の火球となることだろう。(5)式で得られる明るさは、火球を100kmの距離から見た時の写真等級の0等星の明るさを単位としたものである。これは、地球で見られる流星がおよそ100km上空に観測されるところからきている。

以上のモデルを元に初期質量を仮定して木星に衝突する彗星による火球の明るさの時間変化の一例が図1である。初期質量は、CCD測光から推定した $3 \times 10^{13} \text{ kg}$ を用いた[6]。エネルギーの放出は約1秒程度の短い時間に集中していることがわかる。明るさの極大は、等級に直すと実に-40等よりも明るいという凄まじいものになる。ただし、衝突は木星の裏側で起こることになっているために衝突による発光を直接見ることはできない。この明るさは、もし、表側で起こったとすると、マイナス10等以上にもなり、昼間でも見えるほどである。

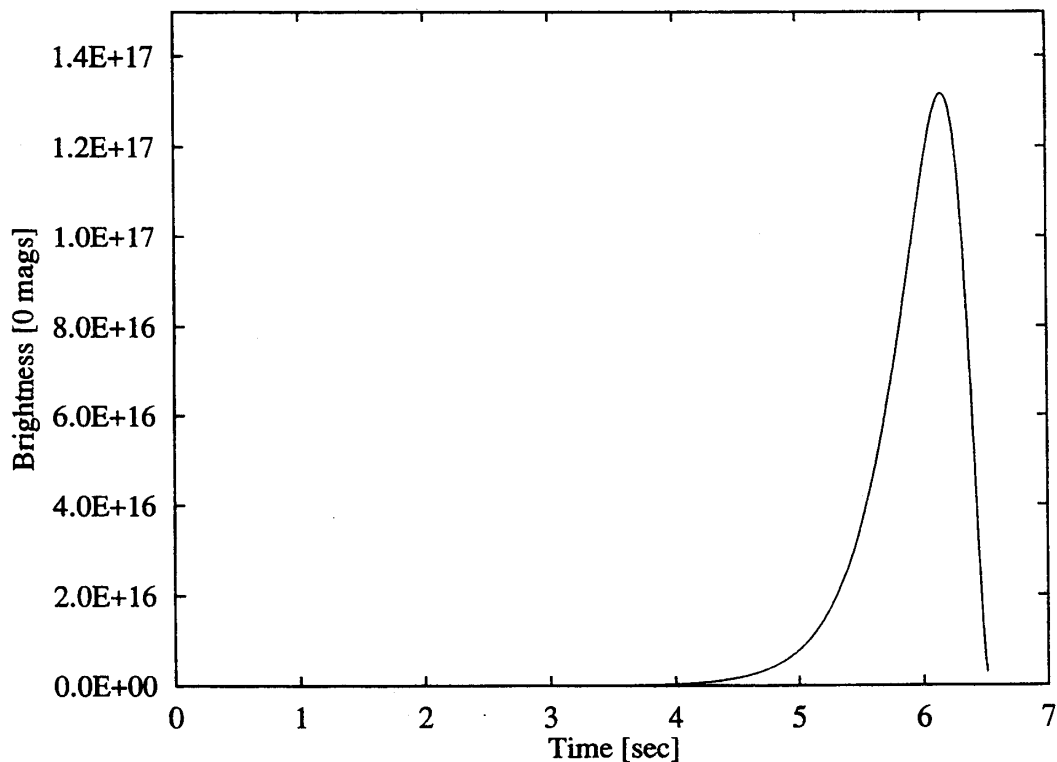


図1. 質量 $3 \times 10^{13} \text{ kg}$ の彗星核の光度変化。横軸は時間、縦軸は明るさである。

図2は、突入する彗星核の質量を 10^{11} kg から 10^{15} kg までの範囲で変えて計算した結果である。ただし、横軸は図1とは異なり、気圧に取っている。より大きな核が衝突すれば、より大気の深いところまで達することがわかる。我々の計算では、彗星核は 10bar 前後まで達し、最終的には全て消滅することがわかる。ところで、最近になって通常観測される流星や火球よりももっと大きな天体の衝突についての研究も進んできている。例えば、[7]や[8]は、ある程度大きな天体では衝突天体の前面に衝撃層が発達し、その天体の摩擦を押さえる働きを示している。もし、衝撃層によって制限されるならば、より大気の深いところまで彗星核が達することになる。そうなると、発光の最大が雲の遥か下となってしまって、果たして外から見えるのだろうかという不安の残る。また、彗星核は衝突前に再び潮汐力によって破壊されるだろうか？そして、大気との衝突による強烈な圧

力に耐えられるだろうか？我々は注意深く衝突時の光度変化を調べることによって、その実体を明らかにすることが可能になるだろう。ただし、前述したように衝突を直接見ることができないので、衛星を通してその反射光を調べることになる。

衝突は-40等を越える明るさであるからガリレオ衛星をかなり照らすことになるだろう。特に最も内側を回るイオは、衝突の見える位置にいれば、相当量の光を受けることになる。

図3はイオに入射する光量から、その反射光の増える割合を等級で示したものである。まだ、現時点では個々の彗星核の衝突時刻の予報は難しく、ここでの値は、位相角0度で衝突を見た理想の場合のものとなっている。我々の見積りはおそらく上限を示すものかもしれないが、衝突時に衛星の光度変化を観測することは確実にできるだろう。分裂した彗星核は現在のところ約20個ほど数えられている。それらの衝突は、6日ぐらいかけて次々

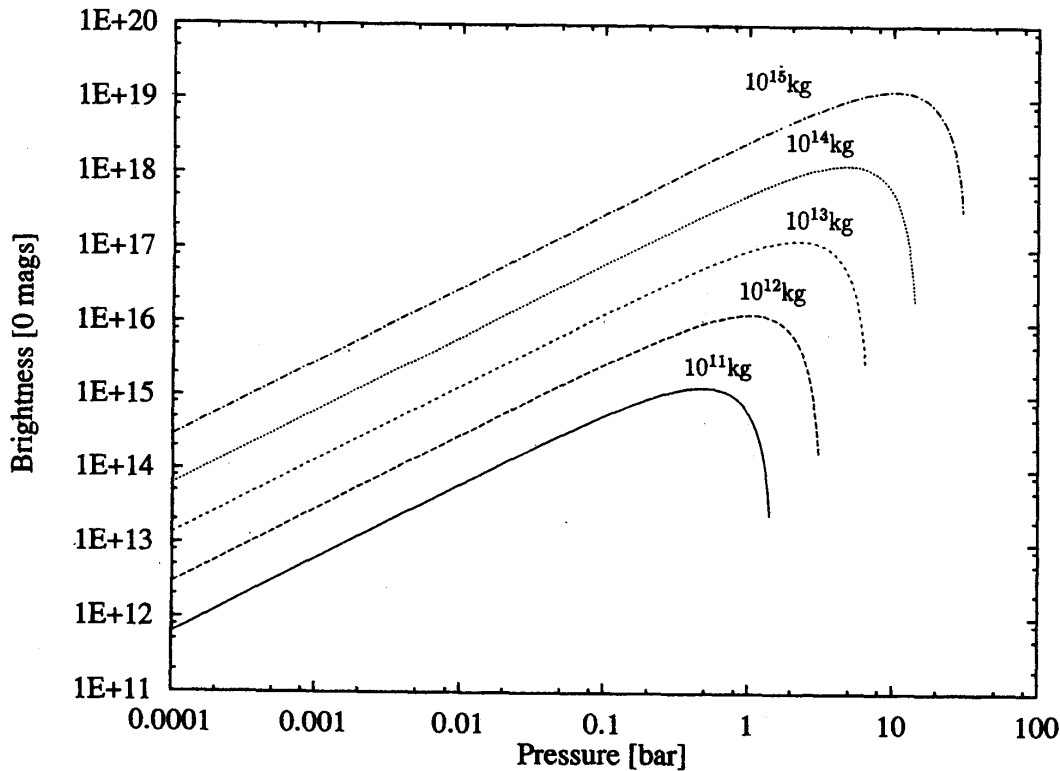


図2. 質量の異なる彗星核の光度変化。横軸は気圧。

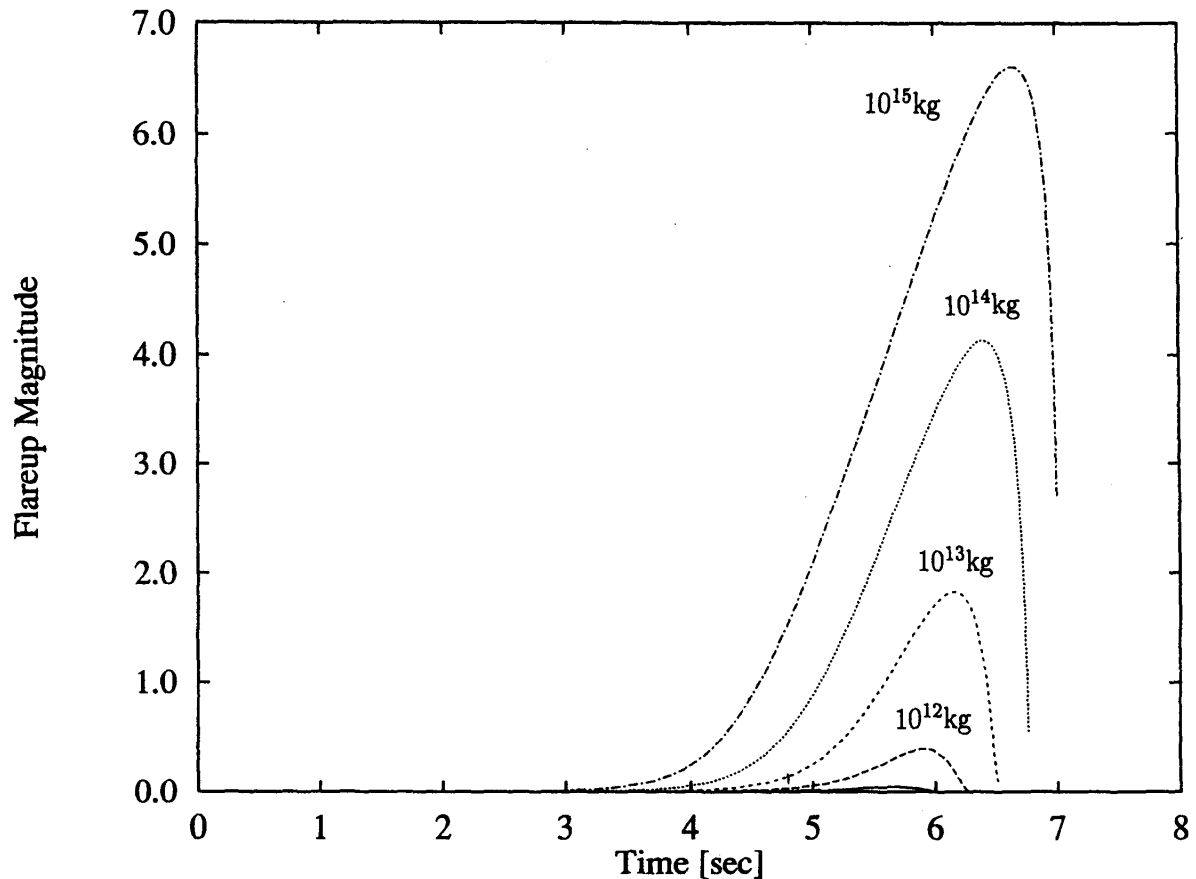


図3. ガリレオ衛星の反射光の変化.

と起こるので、観測するチャンスは複数回ある。是非、高速光電測光観測で狙ってみたい現象である。イオは約5等級と明るいので比較的小口径の装置でも観測が可能なので、多くのアマチュアにも呼びかけて観測体制を作りたいと考えている。

3. 大気に放出される彗星物質の観測

木星大気の主成分は水素が90%、ヘリウムが10%、残りはアンモニアやメタン、水蒸気が微量成分として含まれている。これらの組成比は、原始太陽系星雲から取り込まれたために、ほぼ太陽の元素組成比に近い値を示している。しかし、アンモニアやメタンは、太陽組成の2倍程度含まれている。また、水についてははままだはっきりしていないが、VoyagerのIRISのスペクトルを精密な

モデルを用いて解析した結果、これまで観測的には少ないとされていた水が大量に含まれている可能性が最近指摘されている[9]。これらの供給源として彗星の衝突が上げられる。

彗星核を氷の塊と考えて、大気中に放出される水蒸気量を見積もってみたのが図4である。衝突直後の火球の経路上にどのぐらいの半径で物質が放出されるかわからないので、ここでは半径100kmと1000kmの場合について、質量が 3×10^{13} kgの彗星核の衝突についての密度を示した。比較のために、熱化学モデル([10],[11])を基にして計算した雲の密度も示しておいた。このモデルでは、木星大気として太陽の元素存在度を仮定してある。木星の雲は上層からアンモニア、 NH_4SH 、水の順で形成されると考えられている。そして、

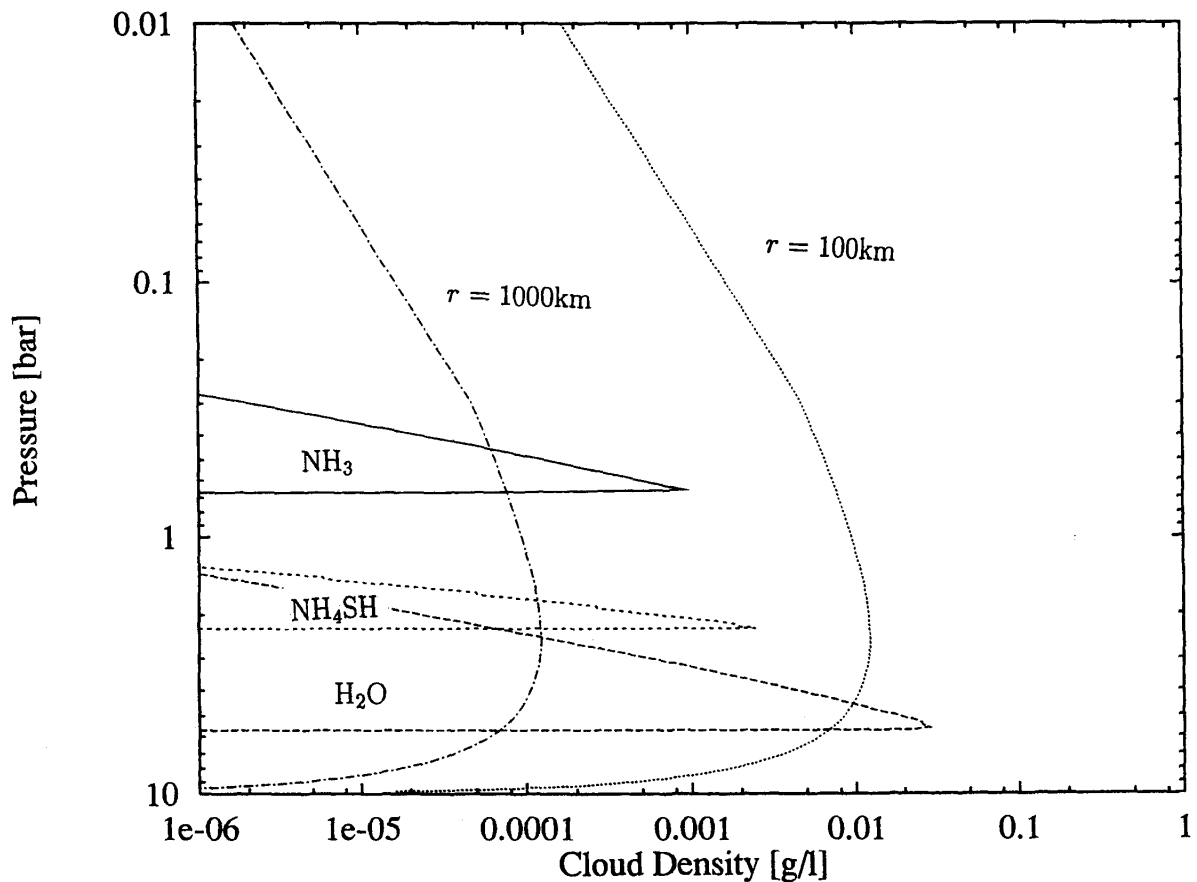


図4. 大気に放出される彗星物質の分布. 縦軸は気圧, 横軸は密度. 熱化学モデルから推定される雲の密度分布も示してある.

これらの雲に加えて, 木星大気の成層圏から対流圏にかけて彗星から放出された水蒸気は冷却されて氷の雲を作ることが期待される. その雲の密度は, 成層圏下部に観測されるヘイズと比較して充分厚く, また水の氷は太陽光をよく散乱するので観測的に捕らえられる可能性が高い. ただし, 空間スケールが小さいので(1000kmのオーダーとしても角度の1秒以下である), 連続光では周囲とのコントラストが稼げず観測は難しいかもしれない. しかし, 自転によって周辺に近いあたりにきたときには下層の雲からの散乱光が周辺減光によって弱められるために見やすくなるだろう.

より積極的に放出された彗星物質を捕らえようとするならば, メタンの吸収帯で見ることがだろう. 近赤外領域では, 0.89, 1.7, 2.3 μm 付近にメタン分

子による強い吸収帯がある. 木星大気の対流圏から成層圏にかけての温度気圧環境ではメタンは飽和することはないので, 対流圏から成層圏下部にかけてはほぼ一様の混合比で存在する. 3 μm より短い近赤外領域で見る木星は, 主として太陽光がアンモニアの雲粒子によって散乱されたものを見ることになる. この雲頂高度が異なるとメタン大気を通過する光路の差により吸収量が異なる. このことを利用してメタンによる吸収量の違いから雲の高さを推定することができる(例えば, [12]). 特に, メタンの吸収は強いので, 背景となるアンモニアの雲からの散乱光は相対的にかなり弱められ, 彗星によって上層に巻散らされた雲を高いコントラストで見ることが出来る. この雲の輝度を測定することによって放出された物質の量を推定

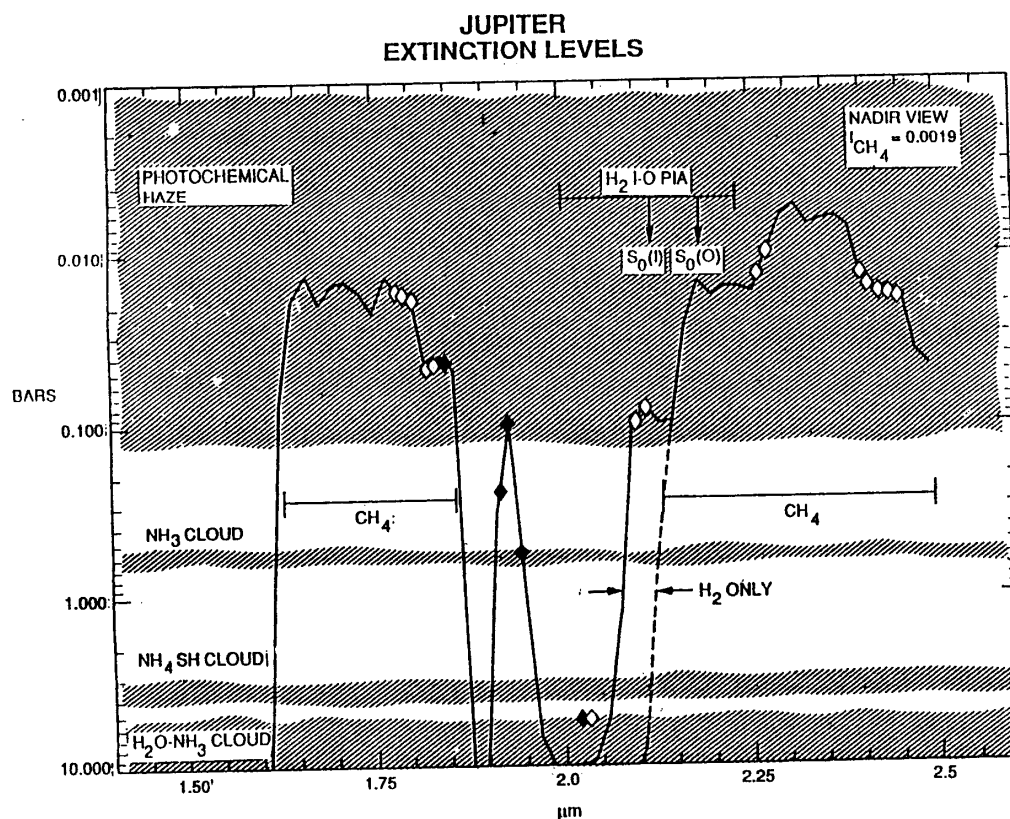


図5. 近赤外領域での光の到達を示した図. [13]

することが可能になる. 図5はメタン吸収の実験を基に近赤外領域での減光を示したものである [13]. 1.7と2.3 μm のメタン吸収帯ではおよそ10mbar付近に放出された彗星物質を見ることができよう. 衝突は南緯40度の緯度圏にそってランダムに起こるので, 上層に放出された彗星物質による雲は, 最終的には周囲のジェット気流に流されてその緯度圏にそって帯のようになるかもしれない.

4. まとめ

以上, 彗星の衝突によって木星大気に起こり得るであろう現象のうち, 火球現象と, それによって放出された彗星物質の光から近赤外での観測可能性について述べてきた. 光でガリレオ衛星からの衝突の反射光を詳しく分析することによって衝突の規模が明らかになるだろう. また, 彗星核自

身の分裂, 破壊などの有無もその測光観測から明らかになるだろう. 近赤外では, 彗星から大量に放出された物質が上層に雲を作るのを見ることができよう. その物質の上層大気での拡散過程を追跡するのは, 木星大気の成層圏循環を知る上で大変興味深いものである. この他に, 分光学的には, これまで木星大気の深部に存在するだろうと言われているが, まだ見つかっていない硫化水素の検出なども興味深いただろう. 衝突によって下層から上層まで巻き上げられれば, もし存在するならば見つかる可能性がある. また, 中間赤外からマイクロ波電波にかけては, 衝突による大気の加熱の検出がおもしろいだろう. 衝突後しばらくは, 小さな渦が形成される可能性もある. 考えれば考えるほどいろいろなことが起こりそうである. しかし実際に何が起こるかは観測してみなければわからない. 可能な限りの波長での観測を残した

いものである。このような巨大な衝突は、人類にとって最初のできごとであり、それを観測することができる我々は大変幸福であると思う。

参考文献

- [1] Chapman, C. R., 1993, Comet on target for Jupiter: *Nature* 363, 492-493.
- [2] Hasegawa, H., and Takata, M., 1993: Predicted brightness variation of the collision of periodic comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter : *P.A.S.J.* submitted.
- [3] Bronshten, V. A., 1983: *Physics of Meteoric Phenomena*. Reidel, Dordrecht.
- [4] 長沢工, 1981; 流星観測の立場から見た隕石落下, 月刊地球 33, 588-596.
- [5] Cook, A. F., and Duxbury, T. C., 1981: A fireball in Jupiter's atmosphere, *J. Geophys. Res.* 86, 8815-8817.
- [6] Watanabe, J., Hirota, Y., and Abe, M., 1993: Split nuclei of periodic comet Shoemaker-Levy 9 1993e, *P.A.S.J.* submitted.
- [7] Walker, J.C.G., 1986: Impact erosion of planetary atmospheres: *Icarus* 68, 87-98.
- [8] Zahnle, K.J., 1992: Airburst origin of dark shadows on Venus, *J. Geophys. Res.* 97, 10243-10255.
- [9] Carlson, B. E., Lacy, A. A., and Rossow, W. B.: 1992, The abundance and distribution of water vapor in the Jovian troposphere as inferred from Voyager IRIS observations. *Astrophys. J.* 388, 648-668.
- [10] Weidenschilling, S. J. and Lewis, J. S., 1973: Atmospheric and cloud structures of the Jovian planets, *Icarus* 20, 465-476.
- [11] Atreya, S. K., and Romani, P. N., 1985: Photochemistry and clouds of Jupiter, Saturn and Uranus, In *Recent Advances in Planetary Meteorology* 17-68, Cambridge Univ. Press, London.
- [12] Satoh, T. and Kawabata, K., 1992: Methane band photometry of the faded South Equatorial Belt of Jupiter, *Astrophys. J.* 384, 298-304.
- [13] Baines, K. H., West, R. A., Giver, L. P., and Moreno, F., 1993: Quasi-random narrow-band model fits to near-infrared low-temperature laboratory methane spectra and derived exponential-sum absorption coefficients. *J. Geophys. Res.* 98, 5517-5529.