

Sheemaker-Levy 彗星 (1993e) の木星への衝突で何が起こるか?

長谷川 均

Hitoshi Hasegawa

4/Jul/1993 流星物理セミナー

1 Comet Shoemaker-Levy

- 発見
1993年3月24日。Shoemaker夫妻とLevy氏 (IAUC 5725)
- 軌道要素 (IAUC 5800)

Epoch	=	1993 June 22.0 TT
T	=	1998 Apr. 5.7514 TT
Peri.	=	22.9373
e	=	0.065832
Node	=	321.5182 2000.0
q	=	4.822184 AU
Incl.	=	1.3498
a	=	5.162007 AU
n	=	0.0840381
P	=	11.728 years

2 衝突

- 過去の木星への接近は1992年7月8.8日 UTで、木星に0.0008AUまで接近(ロシュ限界の内側)。そして、1994年7月25日に0.0003AUまで接近する。木星の半径は0.0005AUなので衝突ということになる。ただし、衝突は裏側で直接見えない。
- 衝突の確率は、JPLのYeomansによれば、64パーセント (IAUC 5807)。
- ハワイ大学のTholenによれば6月上旬までの

軌道計算によれば衝突の確率は100パーセントになったという (NetNews sci.astro, Jun 25より)。

- Paul Chodasによれば、衝突は、1994年7月22.06日。衝突緯度は-34.5度 (STBからSTZのあたり)、衝突速度は59.9km/s (IJW Mailing-List, Jun 28より)。木星進出速度約60km/s
木星の衛星になっている

3 衝突の明るさの見積り

流星の研究から大気へ突入前の質量と明るさには、次の関係が知られている (Cook et al., 1980)、

$$M = \frac{2}{\tau V^2} \int I dt$$

M : mass outside the atmosphere

V : velocity

I : luminosity

τ : luminous efficiency

彗星の破片を半径1kmとすると、その質量は $M = 4.2 \times 10^{12} \text{kg}$ となる。速度 V を 60kms^{-1} とすると、運動エネルギーは、 $1/2 MV^2 = 7.5 \times 10^{21} \text{J}$ となる。 $\tau = 5.4 \times 10^6 \text{mag kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-3}$ を用いると明るさ I は、

$$4.1 \times 10^{16} \text{mag} \cdot \text{s}$$

となる。1秒間の間に0等星が 4.1×10^{16} 個も光ったのと同じ明るさである。これを等級で表わし、さら

0等星が何個光ったか。

に火球の絶対等級を 100km の距離から見た明るさとする、 d km を火球までの距離とすれば、

$$m_0 = m + (10 - 5 \log d)$$

と書ける。これより -41.5mag という明るさになる。また、破片の半径を 5km とすると -46.8mag という凄まじい明るさとなる。ただし、これだけの天体であるので残存質量があると思われるので、この予想は上限値として取る考えるべきだろう。この衝突が木星の表側で発生したとしたら、その明るさは、半径 1km の衝突場合 -7mag、半径 5km の核の場合、-12mag という明るさになり、昼間でも見えるほどである。

4 ガリレオ衛星からの反射光

理科年表によれば、一番内側のイオの軌道半径は木星の半径の 5.9 倍。この距離 () から見た衝突の明るさは、

- 半径 1km の破片の場合 -23.8mag
- 半径 5km の破片の場合 -29.0mag

とる。木星の距離での太陽の明るさは、

$$+5 \log R (R = 5AU)$$

で補正すると -23.2mag。したがってイオから見ると太陽が 2 つあるようなものとなる。したがって、条件の良い位相角で衝突が起こるとイオの反射光は 2 倍から 100 倍程度になり、等級にして 0.5 から 5mag ぐらい明るくなることになる。もし直径 10km ぐらいの破片が衝突したら、イオが 0mag ぐらいになって肉眼でも見えるかもしれない。

5 衝突後はどうなるか?

- 衝突前に潮汐力によって彗星核が破壊されれ彗星雨となる?
- 衝突は複数回起こる。

3日間ぐらいかかる。

- 彗星の破片は突入時に大爆発する。
- 彗星の主成分である氷が蒸発して水蒸気の雲が上層大気に形成される。これは地上からも見えるはず。
- 木星大気内部から大規模な上昇気流が発生する。
- 大気に渦が形成され、しばらく永続する。衝突による爆発などの水平スケールがロスビーの変形半径 (木星の場合、対流圏で 1000km 程度と見積もられている) より大きいと渦となる可能性がある。
- 爆発によって大気が温められ thermal feature が形成される?
- 次第に大気運動によって拡散していく。
- 衝突しなかった場合でも潮汐力によって彗星は破壊されリングが形成されるかもしれない。

6 どんな観測が可能か?

- ガリレオ衛星 (特にイオ) の光電測光による衝突の光度変化の観測。
- 可視光による衝突の痕跡の追跡観測。上層大気のトレーサーとして利用できる。
- 赤外による衝突の痕跡の追跡観測。近赤外では、 $0.89\mu\text{m}$ 、 $1.7\mu\text{m}$ のメタン吸収帯などの波長で散乱光を減らすことが可能。上層に巻き上げた雲の観測が可能。中間赤外では衝突の爆発によって温められた大気を観測可能。
- ミリ波干渉計 (ヘリオグラフ) による観測。衝突によって温められた大気を観測可能。
- 電波による分子スペクトル観測により、彗星本体の分子、木星大気深部から湧きだしたガスを検出できるかもしれない。

2. Model Calculations

Meteorite fall phenomena in the terrestrial atmosphere have already been extensively studied so far (e.g., Bronshten 1983). We now, apply a single particle model to the entry of a larger cometary nucleus into the Jovian atmosphere, because of a lack of knowledge concerning such extraterrestrial meteorite phenomena. When an entering nucleus does not fragment into pieces, the two-dimensional momentum equations of the nucleus within the atmosphere in the planetocentric coordinates on the orbital plane are

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

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

where, u and v are the velocity components in the x and y directions respectively, r is the distance from the center of the planet. Since we assume spherical geometry for the planet, we can take x to arbitrary direction. V is the absolute value of the velocity, m is the mass of the cometary nucleus and μ is the gravity constant of Jupiter. C_D is the drag coefficient and A is a nondimensional shape factor. We assumed 1.2 for C_D and 2.0 for A . ρ_m is the density of the nucleus. We assumed 1.0 g cm^{-3} for ρ_m . ρ is the atmospheric density. If we consider an isothermal atmosphere, the atmospheric density is expressed by

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

where h is the height from a reference level where the density is ρ_0 . We set the reference level to 1 bar. H is the scale height of the atmosphere and is expressed by $H = RT/m_a g$, where R is the universal gas constant, T is the atmospheric temperature, m_a is the mean molecular weight of the Jovian atmosphere, and g is the acceleration of gravity. We assumed the temperature of the isothermal atmosphere to be 120 K, which corresponds to the cloud-top temperature. If the comet cannot reach 10 bar or the 300 K level, this profile provides a good approximation.

The nucleus penetrating into the atmosphere abrades its surface by collisions with atmospheric molecules while losing its original mass. The mass loss rate is

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

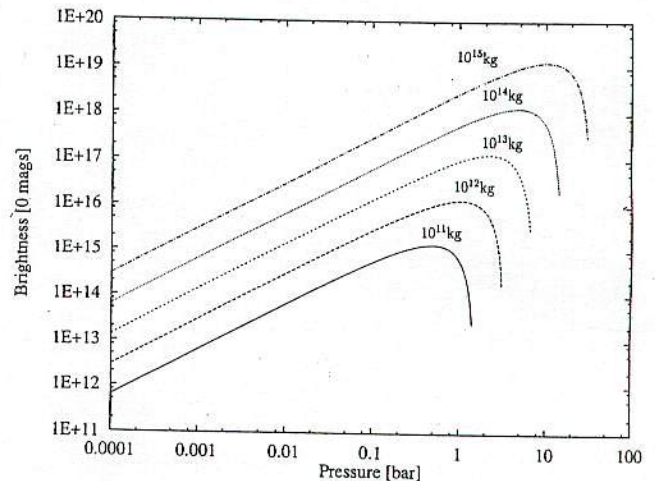
where S is the cross section of the nucleus, Λ is the heat-transfer coefficient and ζ is the heat of vaporization, or ablation. Neither Λ nor ζ have yet been determined accurately; we therefore parameterized $\sigma = \Lambda/C_D \zeta$ as the ablation parameter and assumed $5.0 \times 10^{-8} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$ for the value of σ . This is a typical value for a somewhat fragile meteorite.

The mass-loss rate and brightness of the bolide are related as (Bronshten 1983),

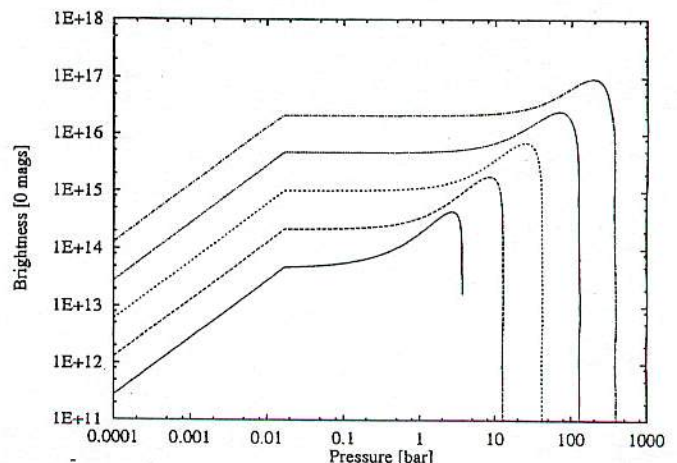
$$\frac{dm}{dt} = -\frac{2}{\tau V^2} I, \quad (5)$$

where I is the brightness and τ is the luminous efficiency. We assumed that $\tau = 5.4 \times 10^6 \text{ 0 mag kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ according to Cook and Duxbury (1981). The 0 mag denotes the brightness of a 0 magnitude star. They estimated the mass of the first fireball observed at the night side of Jupiter by the Voyager 1's camera, while assuming this efficiency. The brightness used here has been normalized to a brightness at a 100 km distance.

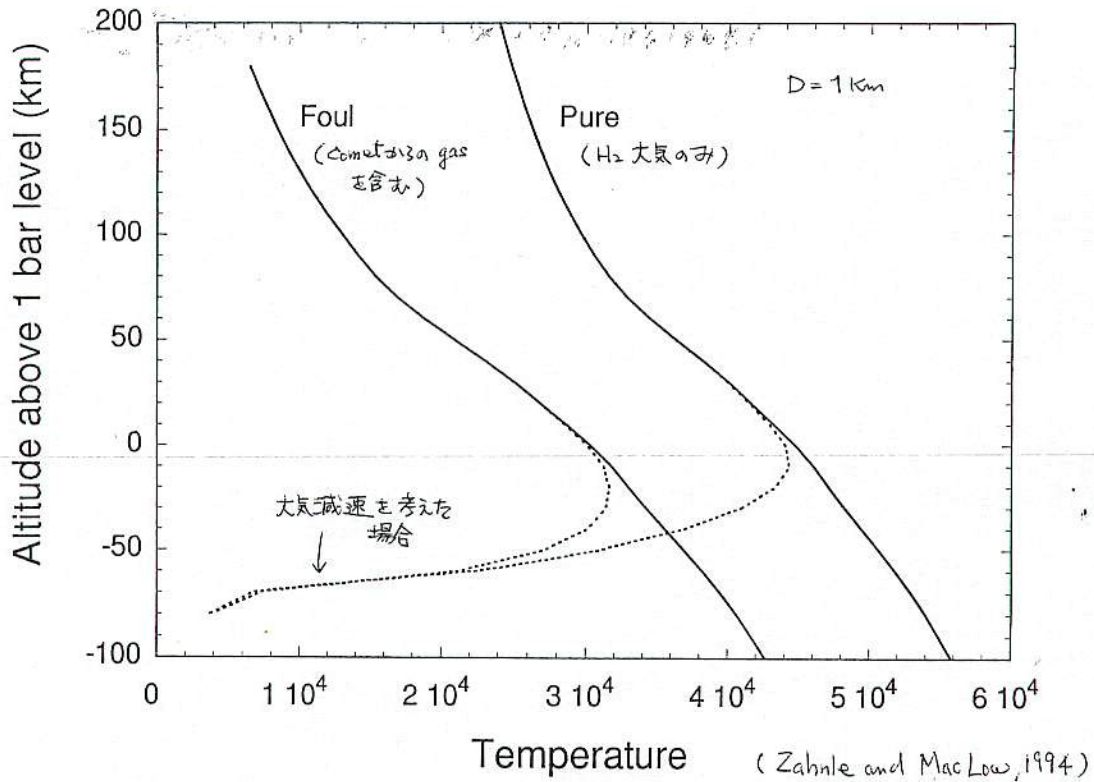
We solved the above set of the equations numerically using a Runge-Kutta-Gill scheme. We started the calculation with the initial height of a nucleus being 500 km above the reference pressure level, and having an initial velocity of 60 km s^{-1} . Although a larger entry zenith angle would cause a lower brightness maximum, the reduction is found to be small within 30 degrees in our calculations, which are not presented here; the predicted entry zenith angle is small. We therefore take a zenith angle of 0 degrees for this first-order estimate.



(Hasegawa & Takata, 1993 #4)



(標本, 長谷川, 高田, 1993 #1)



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失われる。Chyba et al.(1993) によれば、質量の減少率は、彗星核の前面に、木星大気との激しい衝突によって発生する、shocked gas layer の温度が20000-30000K になると layer からの熱放射によって表面の蒸発や剥離が起こるため、変化する。

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{A}{Q} \min\left(\frac{1}{2} C_H \rho |V|^3, \sigma T^4\right) \quad (5)$$

ここで、 C_H は、熱輸達係数 (= 0.1) で、衝突エネルギーが熱に変換される割合を示す。 Q は彗星の気化熱 (= 2.5×10^{10} erg/g)、 σ はステファン・ボルツマン定数、 T は shocked gas layer の温度であり、Chyba et al.(1993) より、30000K を採用した。

彗星は、大気との衝突の圧力でつぶれて変形するので、彗星核の有効半径 (r_c) も変化する。彗星核の形を、円柱で近似し、円柱の軸方向を突入方向とすると、有効半径の変化は、

$$\frac{d^2 r_c}{dt^2} = \frac{C_D \rho |V|^2}{2 r_c \rho_c} \quad (6)$$

で表される (Chyba et al., 1993)。 ρ_c は彗星の密度であり、 1.0 gcm^{-3} を仮定した。従って、有効断面積は、

$$A = \pi r_c^2$$

である。

問題点

- comet a size がわからない (300m ~ 5km)
- comet a 密度がわからない (0.2 ~ 1.0 g/cm³)
- ablation parameter σ

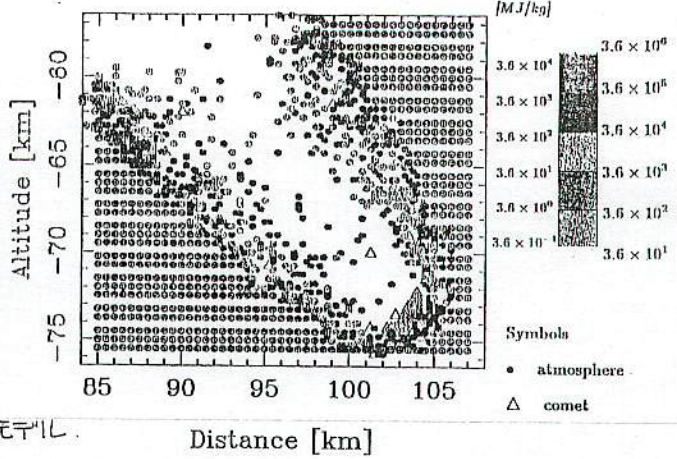
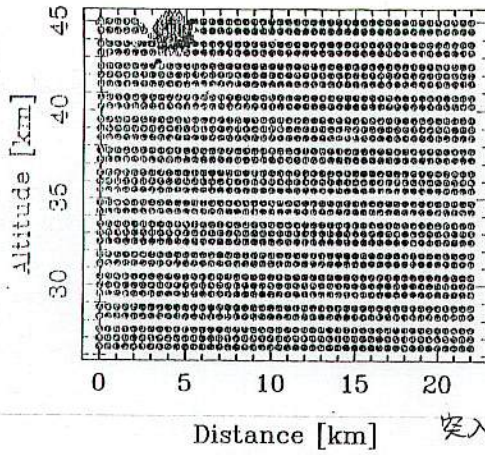
Hasegawa & Takata	$5.0 \times 10^{-8} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$
Sekanina	$2.0 \times 10^{-7} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$
Zahnle & MacLow	$2.4 \times 10^{-8} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$
Takata et al.	$10^{-9} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$
	$10^{-8} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$

- C_H は地球の場合
 $h > 30 \text{ km}$ では ~ 0.1
 地表では ~ 0.002
 constant ではない

(D=2km) } size によって
 (D=10km) } 違う。

Internal Energy : t = 0. [s]

Internal Energy : t = 2.6 [s]



Distance [km]

突入元々

Distance [km]

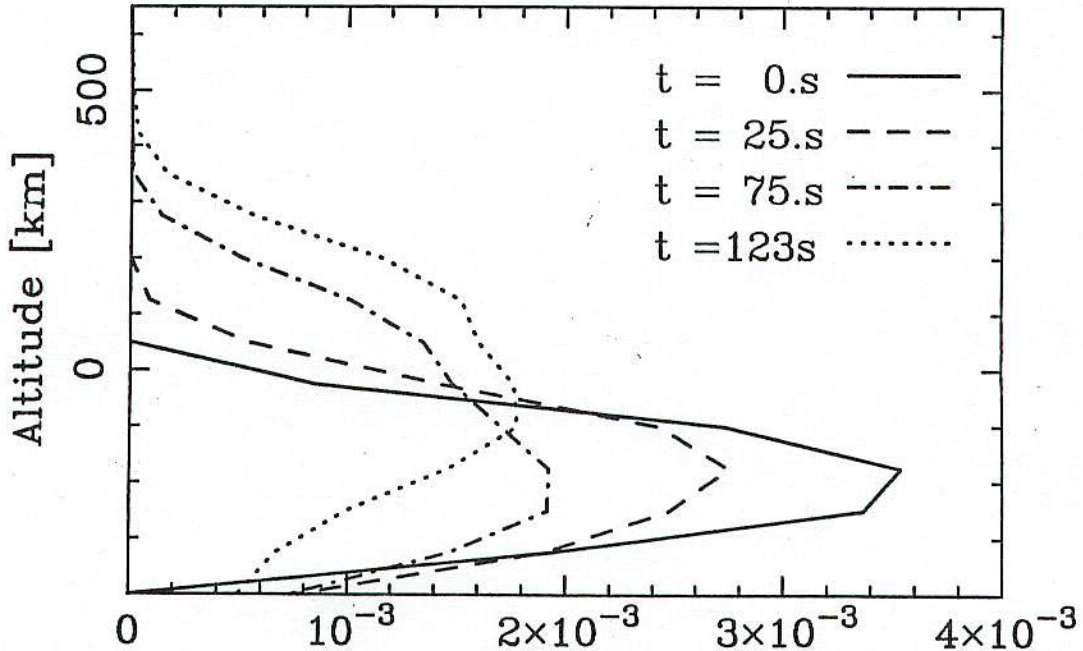


fig.6(b)

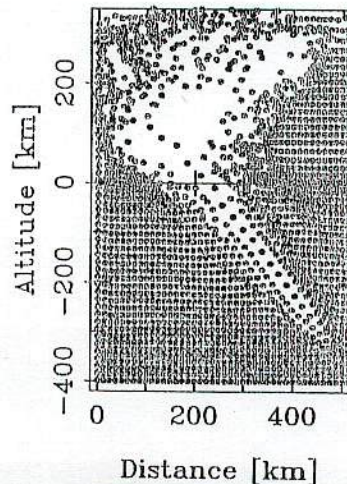
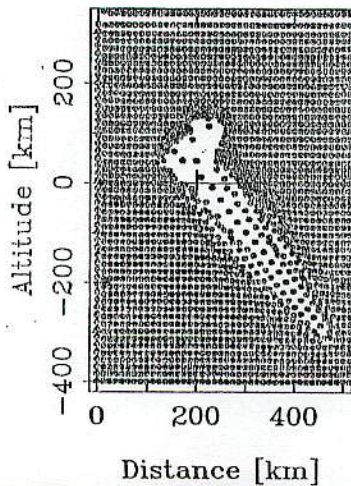
Δ energy [impact energy/km]

Internal Energy : t = 39.0 [s] Internal Energy : t = 82.4 [s]

Takata et al.

1994

衝突後
plumeの形成



2分後
3σ = 雲直径は
500km

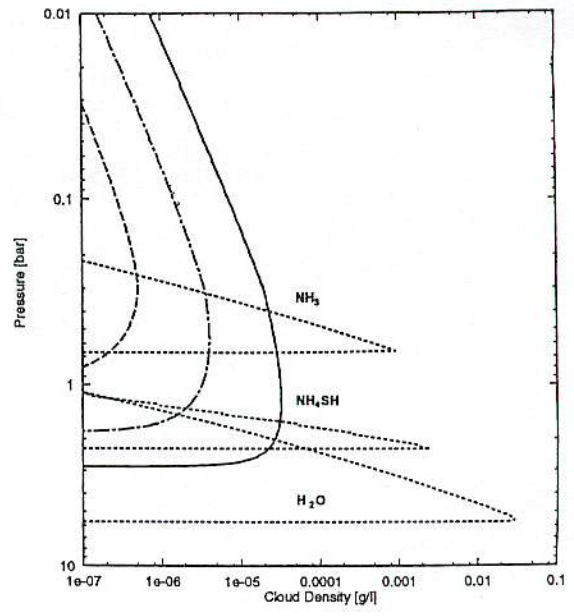
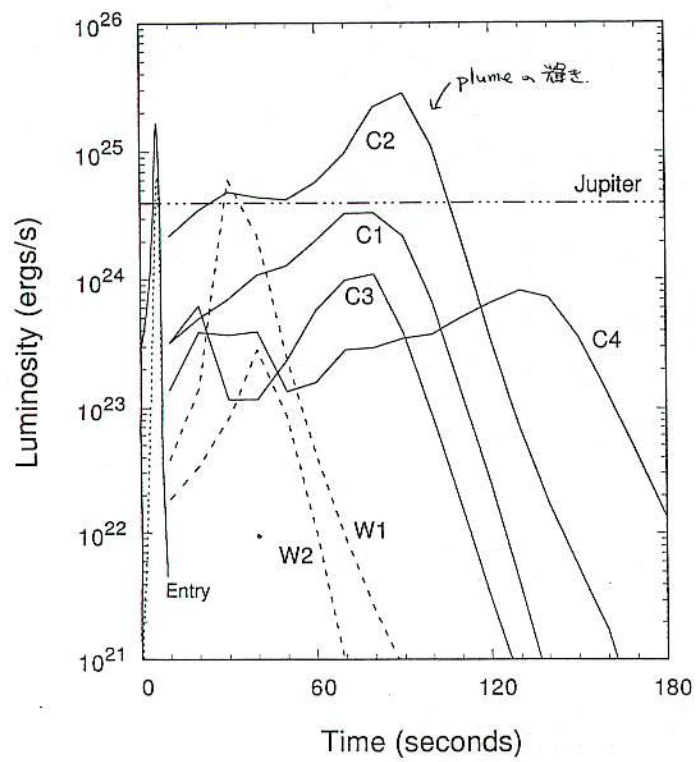
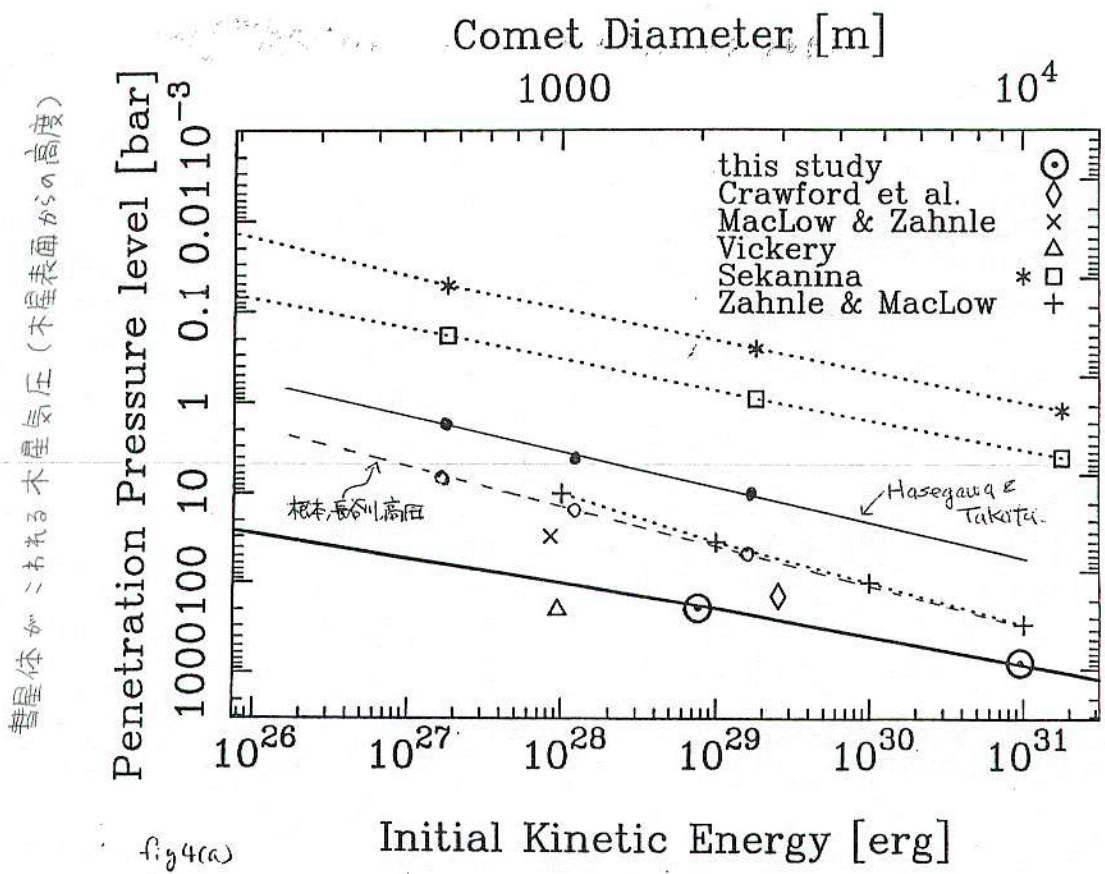


Fig. 1. Calculated density profiles of the cometary water ice cloud for 10¹¹, 10¹² and 10¹³ kg mass of nuclei from left to right, when the entry cylinder has expanded to 1000 km radius. Cloud densities for the solar composition atmosphere are also plotted for reference

シューメーカー・レビー9彗星木星衝突直前情報

I J W 6月18日の情報から、JPLのChodas, Yeomans, Sekaninaによる6月12日付け衝突予報を転載する。天文雑誌で紹介されている2月時点の予報に比べて予報精度が上がり±20分程度の誤差となった。

日本で観測が可能な19h-23h30mの時間帯に衝突する核をワクで囲んだ。D核の衝突は20h11mでIoが衝突の反射光を受ける位置にいる。ただしHSTの観測によれば、D核は相当に淡くなっている。K核は19h26mで、この核の衝突のみがEuropaの食中に起こり、もし十分な反射光があれば食中のEuropaが光るのが見えるかも知れない。K核はかなり明瞭である。

N核は19h09mの衝突なのでまだ薄明がある。この核もかなり淡くなっている。

長谷川(1994)によれば、 10^{12} kgの核の衝突によるIoの反射光は0.1mag程度ということで眼視的に見分けるのはたいへんむずかしいが、K核のように食中の(全く見えない)Europaが光るのであれば比較の見分け易いのではないだろうか。

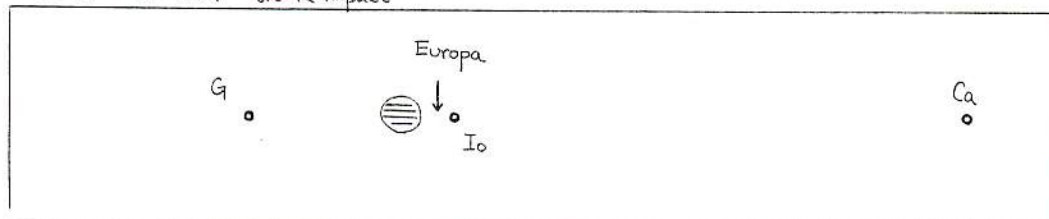
おおざっぱな計算ではEuropaは太陽に照らされたときより4mag程度暗く光ると思われる。(およそ10mag)

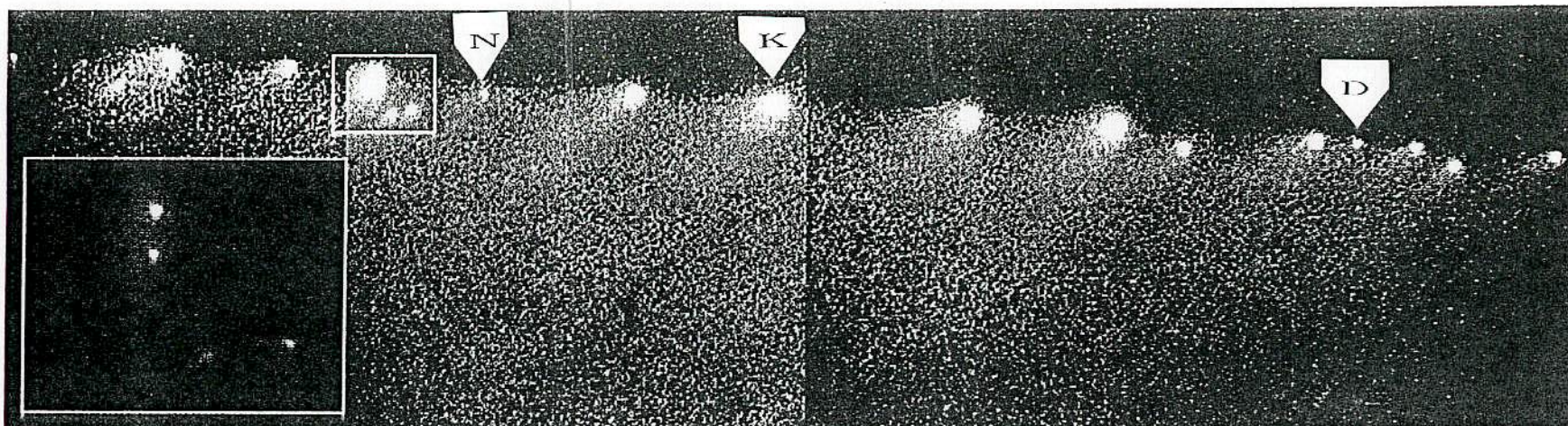
水谷らは(1993)SL9の前の木星接近時にロシュ限界内で核が20個にも分裂したことから、核の破壊強度は $\sim 10^3$ dyne/cm²程度で地上のふわふわした粉体層程度と推定しており、HSTの観測でもJ, M, P1等の核が消失しておりだいぶ破壊が進んでいるように見える。

とすると、実際の衝突時には単一の核が大気に突入するというものではなく、かなり上空で破壊が進んで一気に発光するのではないだろうか。地球の流星でもペルセ群のような速度の速く、流星体密度の低いものは、単一モデルのシミュレーションにくらべてずっと上空で爆発的に明るくなるケースが多い。

今回の衝突でもこの効果が期待できるとすると、長谷川氏の予想より明るくなる可能性も考えられる。

Jul. 19 19^h JST at K impact





Refurbished Hubble Takes Aim at Comet Shoemaker-Levy 9

(BALTIMORE, MD) An early target for the recently repaired Hubble Space Telescope was Periodic Comet Shoemaker-Levy 9, the celebrated train of objects that will crash into Jupiter in mid-July (January issue, page 40). Twenty of its nuclei appear in this mosaic of images from Hubble's new Wide Field and Planetary Camera taken between January 24th and 27th. The total width is $2\frac{1}{2}$ arc minutes, about 605,000 kilometers at the comet's distance. The individual nuclei, none brighter than magnitude 24, have distinct dust tails pushed outward by the Sun's radiation pressure. More material fills the gaps between them. *Inset:* In this close-up the two brightest nuclei appear just $1\frac{1}{4}$ arc seconds apart (about 5,000 km as projected). Courtesy Harold A. Weaver and T. E. Smith (Space Telescope Science Institute) and NASA.

1994 June 18

To: International Jupiter Watch Atmospheres Team,
World Astronomy Day #2 Participants, and Comet Collision Enthusiasts

From: Glenn Orton, IJW Atmospheres Team Chair

Predicted Impact Parameters for Fragments of P/Shoemaker-Levy 9

P. W. Chodas, D. K. Yeomans and Z. Sekanina (JPL/Caltech)
P. D. Nicholson (Cornell)

Predictions as of 1994 June 12
Date of last astrometric data in these solutions: 1994 June 8

The predictions for all fragments except Q2 are based on independent orbit solutions; the orbit reference identifier is now given. The orbit solution for fragment Q2 was obtained by applying a disruption model to the orbit for Q1, and using astrometric measurements of Q2 relative to Q1.

Except for fragment Q2, uncertainties in the impact parameters are given immediately below the predicted values. These uncertainties are 1-sigma values obtained from Monte Carlo analyses; we have made an effort to make them realistic: they are not formal uncertainty values. NOTE: To obtain a 95% confidence level, one should use a +/- 2 sigma window around the predicted values.

The predictions for fragments E, G, H, K, L, Q, R, S, and W are the most accurate, as these have the best-known orbits; fragments T, U, and V have the most poorly-determined orbits, (especially U). The uncertainties for fragment Q2 have not been quantified, but are probably comparable to those for fragment P2.

The dynamical model used for these predictions includes perturbations due to the Sun, planets, Galilean satellites and the oblateness of Jupiter. The planetary ephemeris used was DE245.

SAT III

Frag- ment	Impact Date/Time July (UT)	Jovicentric		Merid. Angle (deg)	Angle E-J-F (deg)	Orbit Ref.	Satellite Longitudes at Impact (deg)			
		Lat. (deg)	Long. (deg)				Amal	Io	Eur	Gany
A = 21	16 19:50 22	-43.12 .27	173 13	63.57 1.11	99.37 .83	A11	201t 11	344 3	106+ 2	76+ 1
B = 20	17 02:46 20	-43.16 .26	65 12	63.01 .97	99.75 .74	B12	50+ 10	42+ 3	136+ 1	91+ 1
C = 19	17 06:50 20	-43.15 .23	212 12	64.33 .99	98.81 .74	C9	172t 10	76+ 3	153+ 1	99+ 1
D = 18	17 11:11 23	-43.11 .28	10 14	63.60 1.16	99.34 .87	D10	304 12	113+ 3	171 2	108+ 1
E = 17	17 15:17 14	-43.56 .09	157 9	66.02 .61	97.52 .44	E26	67+ 7	148+ 2	188 1	117+ 0
F = 16	18 00:16 18	-43.49 .18	124 11	63.58 .85	99.25 .63	F17	338o 9	224 3	225 1	136+ 1
G = 15	18 07:36 13	-43.68 .08	27 8	66.65 .53	97.04 .38	G26	198t 7	287 2	256 1	151+ 0
H = 14	18 19:35 13	-43.77 .08	102 8	67.08 .54	96.71 .39	H24	199t 7	28+ 2	306 1	176 0
K = 12	19 10:26 13	-43.87 .08	280 8	67.87 .54	96.12 .39	K25	286 7	153+ 2	9+e 1	207 0
L = 11	19 22:24 13	-43.94 .08	353 8	68.63 .53	95.56 .38	L26	286 7	255 2	60+ 1	232 0
N = 9	20 10:09 22	-44.30 .15	60 13	67.10 1.04	96.57 .74	N13	280 11	355 3	111+ 2	257 1
P2= 8b	20 14:58 21	-44.57 .13	236 12	65.84 .96	97.40 .68	P12	65+ 11	36+ 3	131+ 1	267 1
Q2= 7b	20 19:40	-44.39	43	69.10	95.14		206	75+	151+	277
Q1= 7a	20 20:07	-44.09	59	69.52	94.89	Q28	220	79+	153+	278

JST
Jul. 17 20^h 11^m ± 23^m

Jul. 19 19^h 26^m ± 13^m

Jul. 20 19^h 09^m ± 22^m

		12	.07	8	.50	.35		6	2	1	0
R = 6	21	05:47	-44.18	49	69.95	94.56	R23	151	161	193	298
		17	.10	10	.68	.48		9	2	1	1
S = 5	21	15:39	-44.21	46	70.63	94.08	S33	88+	245	234	319
		14	.08	9	.55	.39		7	2	1	0
T = 4	21	18:28	-45.23	152	67.93	95.80	T8	173t	269	246	325
		41	.21	25	1.66	1.16		21	6	3	1
U = 3	21	22:52	-44.69	309	70.30	94.24	U9	306	306	264	334
		68	.28	41	2.46	1.72		34	10	5	2
V = 2	22	03:54	-44.38	133	67.88	95.98	V9	97+	349	285	344
		28	.20	17	1.39	.99		14	4	2	1
W = 1	22	08:21	-44.24	292	70.99	93.80	W26	231	26+	303	354
		17	.10	10	.67	.47		9	2	1	1

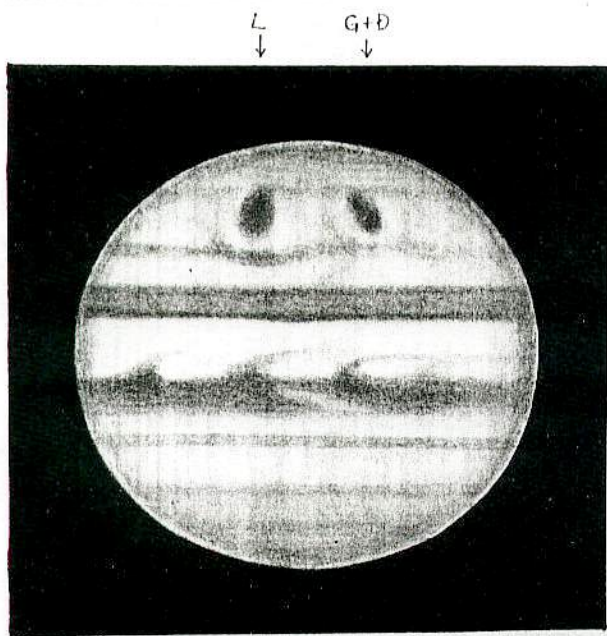
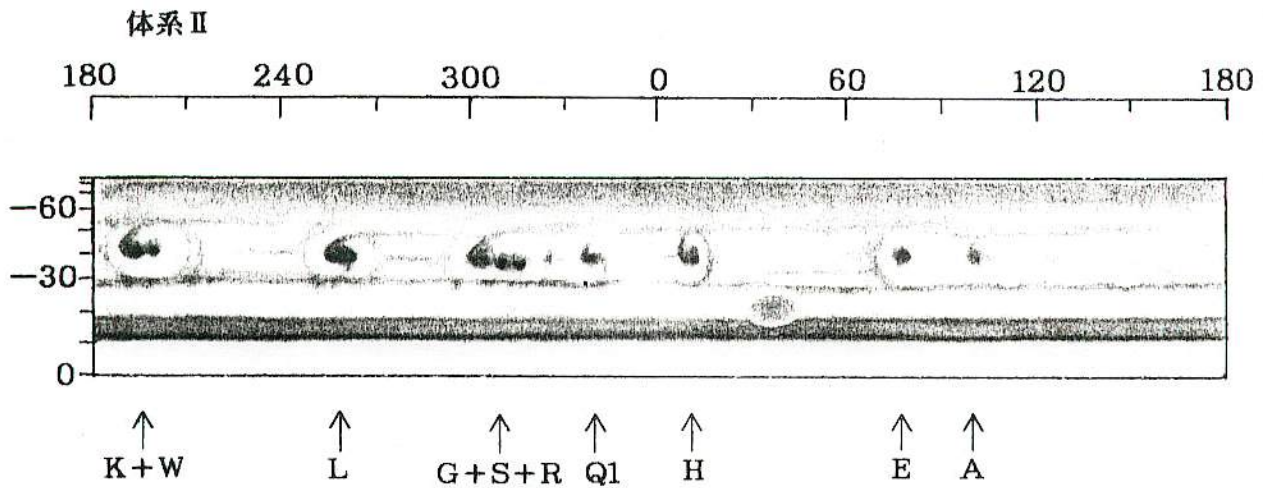
Satellite Codes: + impact is visible from satellite
 o satellite is occulted by Jupiter at impact
 e satellite is eclipsed but not occulted at impact
 t satellite is in transit across Jupiter

Notes:

- Fragments J=13 and M=10 are omitted because they have faded from view. Fragments P=8 and Q=7 each consist of multiple components. The March '94 HST image shows that P1=8a has almost completely faded away (so it too is omitted from the Table), and that P2=8b has split. We do not as yet have sufficient data to obtain independent predictions for the two components of P2=8b.
 - The impact date/time is the time the impact would be seen at the Earth (if the limb of Jupiter were not in the way); the date is the day in July 1994; the time is given as hours and minutes of Universal Time. The impact time uncertainty is a 1-sigma value in minutes.
 - The impact latitude is Jovicentric (latitude measured at the center of Jupiter); the Jovigraphic latitudes are about 3.84 deg more negative.
 - The impact longitude is System III, measured westwards on the planet. The large uncertainty in impact longitudes is due to Jupiter's fast rotation.
 - The meridian angle is the Jovicentric longitude of impact measured from the midnight meridian towards the morning terminator. This relative longitude is known much more accurately than the absolute longitude. At the latitude of the impacts, the Earth limb is at meridian angle 76 deg and the terminator is at meridian angle 87 deg.
 - Angle E-J-F is the Earth-Jupiter-Fragment angle at impact; values greater than 90 deg indicate a farside impact. All impacts will be just on the farside as viewed from Earth; later impacts will be closer to the limb. The probability that any fragment will impact on the near side as viewed from the Earth is < 0.01%.
 - Satellite data are given for Amalthea, Io, Europa, and Ganymede. Callisto is omitted, as it is too distant to act as a useful reflector of the impact flashes, and it has no occultations or eclipses during the impacts. Metis, Adrastea and Thebe are also omitted, due to the expected faintness of any flash reflections from them. The satellite longitudes are measured east from superior conjunction (the anti-Earth direction). Longitude uncertainties listed as "0" are simply < 0.5 deg.
-
8. According to these predictions, the only impact certain to occur during a satellite eclipse is K=12 with Europa eclipsed.

#####

SL-9彗星核衝突痕展開図(7/20~7/25)

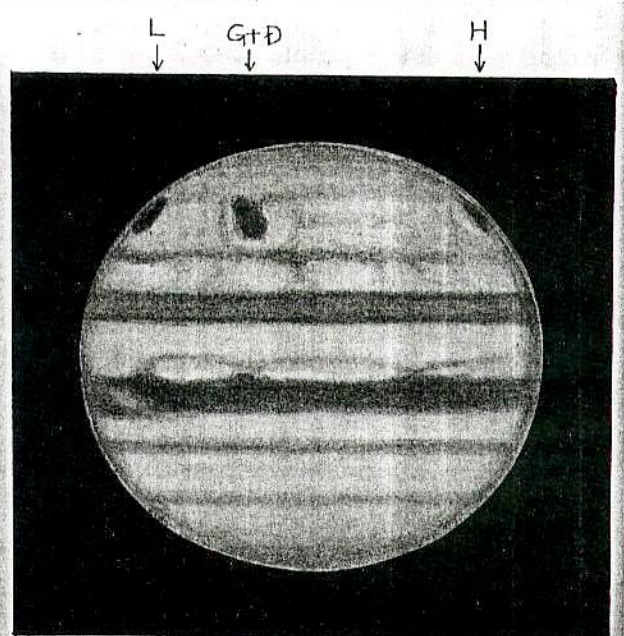


1994.7.20 20:30 JST

$\omega^1 = 246.8$ $\omega^2 = 294.6$ $\omega^3 = 6.6$

20cm反赤 $f=1000$ $\times 200$ (Or5)

快晴 $S = 8/10 \sim 6/10$ $T = 4/5$



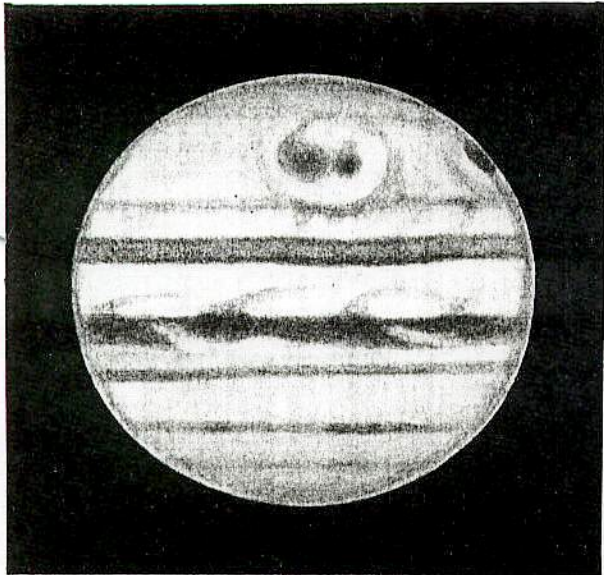
1994.7.20 21:30 JST

$\omega^1 = 283.4$ $\omega^2 = 330.8$ $\omega^3 = 42.8$

20cm反赤 $f=1000$ $\times 200$ (Or5)

快晴 $S = 6/10$ $T = 4/5$

K ↓ W ↓ L ↓



1994.7.22 19:30 JST

$\omega^1 = 165.7$ $\omega^2 = 198.6$ $\omega^3 = 271.1$

20cm 反赤 $f = 1000 \times 200 (0r5)$

快晴 $S = 7/10 \sim 9/10$ $T = 4/5$

K ↓ W ↓ L ↓ G+S+R ↓



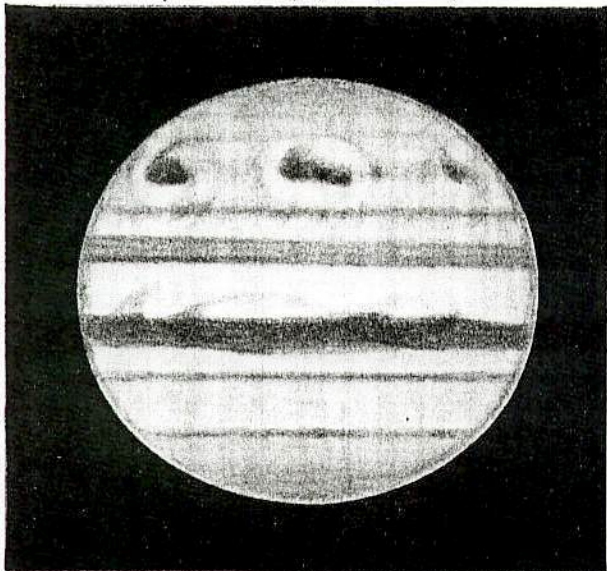
1994.7.22 20:30 JST

$\omega^1 = 202.3$ $\omega^2 = 234.9$ $\omega^3 = 307.4$

20cm 反赤 $f = 1000 \times 200 (0r5)$

快晴 $S = 7/10 \sim 8/10$ $T = 4/5$

L ↓ G ↓ SR ↓ Q2? ↓ Q1 ↓



1994.7.25 20:00 JST

$\omega^1 = 297.3$ $\omega^2 = 307.2$ $\omega^3 = 20.5$

20cm 反赤 $f = 1000 \times 200 (0r5)$

快晴 $S = 7/10 \sim 5/10$ $T = 4/5$

L ↓ G ↓ SR ↓ Q2? ↓ Q1 ↓ H ↓



1994.7.25 21:00 JST

$\omega^1 = 333.9$ $\omega^2 = 343.4$ $\omega^3 = 56.7$

20cm 反赤 $f = 1000 \times 200 (0r5)$

快晴 $S = 6/10 \sim 5/10$ $T = 4/5$

1994.10.16 第72回流星物理セミナー

P/Shoemaker-Levy 9 彗星と木星の衝突 観測報告

彗星物理水曜ゼミ

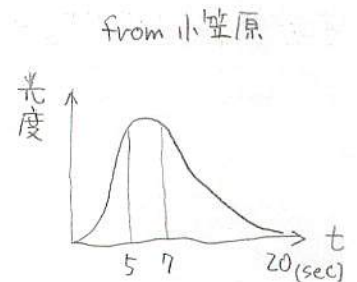
岡拓真, 緒方勇, 河本睦彦, 柴崎勝利, 菅原賢,
高橋織男, 田村裕, 坪内重樹, 橋本岳真, 広住元

I. 目的

1. P/Shoemaker-Levy 9 彗星の直径, 質量の推定
2. 衝突によって引き起こされた現象の観測

II. 観測項目

1. ガリレオ衛星の光電測光(D核, K核衝突時のイオ, エウロパ)
 - 28cmシュミットカセグレン + 2倍パーローレンズ(合成F20)
 - SSP3 + Vフィルター 0.1秒積分
 - NEC 98Note 自動取込み
2. 木星面のイメージング(D核, K核衝突時の木星)
 - 30cmニュートン反射(Or18mm + ST4(フィルターなし) : イオ
 - 20cmシュミットカセグレン + ST4(フィルターなし) : エウロパ
3. ビデオ撮影(7月17日~25日の観測時常時)
 - 28cmシュミットカセグレン + アイピース
 - SONY CCDビデオカメラ(モノクロ)
 - SONY ハンディカム TR55(時刻はJJY録音)
4. 衝突痕CMT観測(7月17日~25日の観測時常時)
 - 28cmシュミットカセグレン(ビデオ撮影時のモニター)
 - 20cmシュミットカセグレン(眼視)



彗星衝突の光度変化

ω_3 に対して、数 m/s
で移動

III. 観測結果

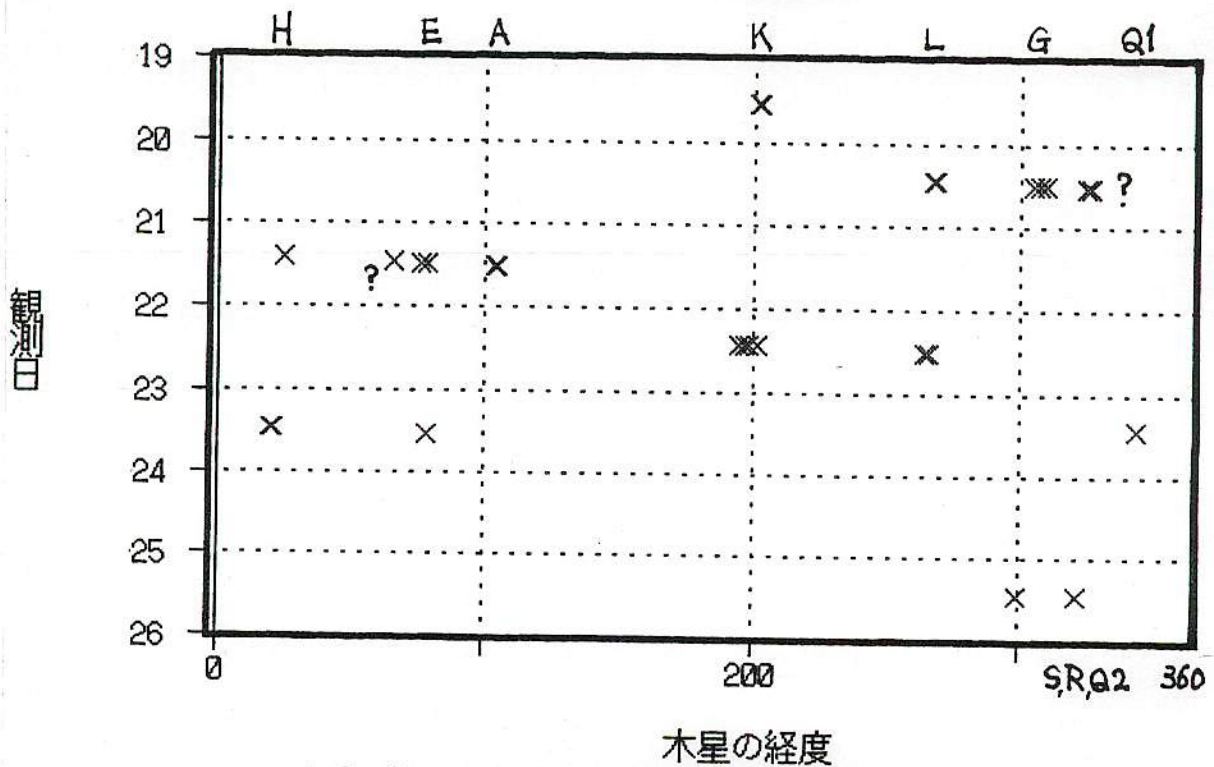
1. ガリレオ衛星の高速光電測光
 - 1) 17/18日 20h41m イオ
天候不順で観測できず。
 - 2) 19/20日 19h47m エウロパ
衛星反射によるフラッシュは観測されず。
2. 木星面のイメージング
画像解析中
3. CMT観測結果

衝突後に衝突痕が確認できた核	A, C, E, G, H, K, L, Q1, Q2, R, S, W
衝突後に衝突痕が確認できなかった核	B, D, M, N, P1, P2, T, V
?	D, F, U,

各衝突痕のCMT観測 ω^2

日時(UT)	対象	経度	観測者	備考	日時(UT)	対象	経度	観測者	備考
7/19.544	K核	201.3	広住元		7/22.433	K核	194.5	橋本岳真	
7/19.545	K核	201.9	橋本岳真		7/22.435	U?核	197.0	橋本岳真	?
7/19.545	K核	202.0	菅原賢		7/22.438	K核	198.1	菅原賢	
7/20.448	L核	267.5	橋本岳真		7/22.440	W核	201.2	橋本岳真	
7/20.449	L核	268.1	岡拓真		7/22.513	L核	264.0	橋本岳真	
7/20.449	L核	268.1	菅原賢		7/22.515	L核	265.8	菅原賢	
7/20.491	G核	305.0	菅原賢		7/23.431	Q1核	343.4	橋本岳真	
7/20.494	G核	307.4	橋本岳真		7/23.432	Q1核	344.0	菅原賢	
7/20.497	G核	309.7	岡拓真		7/23.474	H核	20.2	菅原賢	
7/20.514	D?核	324.9	橋本岳真	?	7/23.474	H核	20.9	橋本岳真	
7/20.514	D?核	325.9	菅原賢	?	7/23.540	E核	78.2	橋本岳真	
7/21.410	H核	24.5	菅原賢		7/23.541	E核	78.2	菅原賢	
7/21.457	F?核	65.6	橋本岳真	?	7/25.450	G核	299.4	菅原賢	
7/21.469	E核	75.8	橋本岳真		7/25.463	SRDQ核	321.7	菅原賢	S,R,Q2核
7/21.469	E核	75.8	菅原賢						
7/21.472	E核	78.2	田村裕						
7/21.501	A核	103.6	橋本岳真						
7/21.501	A核	103.6	菅原賢						
7/21.502	A核	104.8	田村裕						

SL9衝突痕



Predicted Brightness Variation of the Collision of Periodic Comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter

Hitoshi HASEGAWA

ASTECC, Inc., 6 Minamicho, Shinjuku-ku, Tokyo 162
and

Masayuki TAKATA

Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo 153

(Received 1993 September 6; accepted 1993 September 27)

Abstract

We calculated the brightness variations of the impact flash of Periodic comet Shoemaker-Levy 9 (1993e) with Jupiter expected at the end of 1994 July, using a terrestrial bolide model. The calculations showed that the original cometary mass is lost in Jupiter's atmosphere and that the maximum brightness is -10 magnitude for a 3×10^{13} kg nucleus, if we see the crash directly from the Earth. We also estimated the reflected light from the Galilean satellite Io, since the predicted crash will take place on the far side of Jupiter, and showed that it is likely to be observable, if the satellite has a favorable position and the mass of the nucleus is greater than 10^{11} kg. High-speed photometric observations of the satellite at the time of the impact will be able to explore the large cometary impact phenomena in the planetary atmosphere.

Key words: Comets: Individual (Shoemaker-Levy 9 1993e) — Meteors and meteorites — Photometry of Galilean satellites — Planets: individual (Jupiter)

1. Introduction

Periodic comet Shoemaker-Levy 9 (1993e) was discovered by C. S. Shoemaker, E. M. Shoemaker, and D. H. Levy in 1993 March (Marsden 1993a). Subsequent observations have revealed that the comet comprises a string of several comets aspect (Chapman 1993). Orbital calculations suggest that the comet is temporarily trapped around Jupiter's gravitational field; this aspect is thought to be the consequence of a tidal disruption during a close encounter within two Jovian radii in 1992 July (Nakano and Marsden 1993; Marsden 1993b; Carusi 1993). Further, the orbital calculations predict that the comet is on a course of impact with Jupiter, which will take place at around 1994 July 20.

Unfortunately, the predicted collision will take place on the far side of Jupiter, so that we will not be able to see the collision event directly. However, since the impact energy is extremely large, we may be able to see the event as reflected light from Galilean satellites, if one of the satellites has at a favorable position at the time of collision. Because of having a tidally fragmented nuclei, the impact will occur several times over a few days. We will have a chance to observe the impact several times.

We will show here the brightness variation during the entry of the comet into Jupiter's atmosphere using a terrestrial bolide model.

2. Model Calculations

Meteorite fall phenomena in the terrestrial atmosphere have already been extensively studied so far (e.g., Bronshten 1983). We now, apply a single particle model to the entry of a larger cometary nucleus into the Jovian atmosphere, because of a lack of knowledge concerning such extraterrestrial meteorite phenomena. When an entering nucleus does not fragment into pieces, the two-dimensional momentum equations of the nucleus within the atmosphere in the planetocentric coordinates on the orbital plane are

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

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

where, u and v are the velocity components in the x and y directions respectively, r is the distance from the center of the planet. Since we assume spherical geometry for the planet, we can take x to arbitrary direction. V is the absolute value of the velocity, m is the mass of the cometary nucleus and μ is the gravity constant of Jupiter. C_D is the drag coefficient and A is a nondimensional shape factor. We assumed 1.2 for C_D and 2.0 for A . ρ_m is the density of the nucleus. We assumed 1.0 g cm^{-3} for ρ_m . ρ is the atmospheric density. If we consider an isothermal atmosphere, the atmospheric density is expressed by

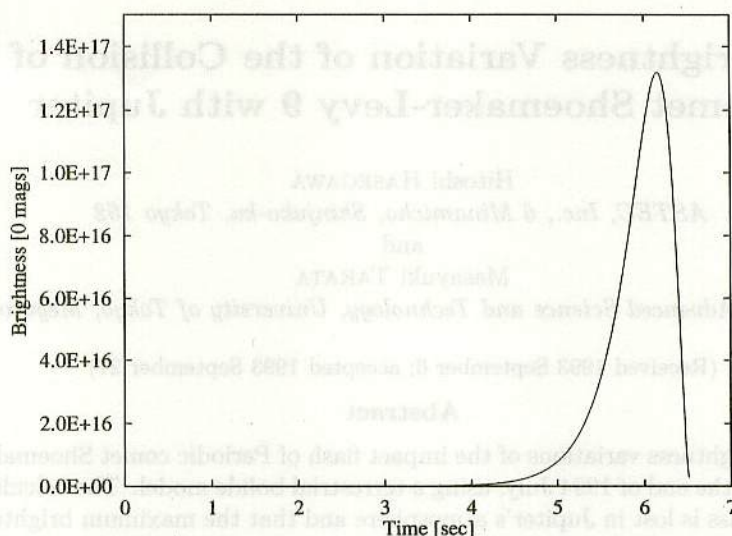


Fig. 1. Brightness variation of the bolide at a distance of 100 km for a 3×10^{13} kg nucleus impact into Jupiter's atmosphere. The brightness is scaled by the number of 0 photographic magnitude stars. The origin of the duration time is arbitrary.

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

where h is the height from a reference level where the density is ρ_0 . We set the reference level to 1 bar. H is the scale height of the atmosphere and is expressed by $H = RT/m_a g$, where R is the universal gas constant, T is the atmospheric temperature, m_a is the mean molecular weight of the Jovian atmosphere, and g is the acceleration of gravity. We assumed the temperature of the isothermal atmosphere to be 120 K, which corresponds to the cloud-top temperature. If the comet cannot reach 10 bar or the 300 K level, this profile provides a good approximation.

The nucleus penetrating into the atmosphere abrades its surface by collisions with atmospheric molecules while losing its original mass. The mass loss rate is

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

where S is the cross section of the nucleus, Λ is the heat-transfer coefficient and ζ is the heat of vaporization, or ablation. Neither Λ nor ζ have yet been determined accurately; we therefore parameterized $\sigma = \Lambda/C_D \zeta$ as the ablation parameter and assumed $5.0 \times 10^{-8} \text{ s}^2 \text{ m}^{-2}$ for the value of σ . This is a typical value for a somewhat fragile meteorite.

The mass-loss rate and brightness of the bolide are related as (Bronshen 1983),

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

where I is the brightness and τ is the luminous efficiency. We assumed that $\tau = 5.4 \times 10^6 \text{ 0 mag kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ according to Cook and Duxbury (1981). The 0 mag denotes the brightness of a 0 magnitude star. They estimated the mass of the first fireball observed at the night side of Jupiter by the Voyager 1's camera, while assuming this efficiency. The brightness used here has been normalized to a brightness at a 100 km distance.

We solved the above set of the equations numerically using a Runge-Kutta-Gill scheme. We started the calculation with the initial height of a nucleus being 500 km above the reference pressure level, and having an initial velocity of 60 km s^{-1} . Although a larger entry zenith angle would cause a lower brightness maximum, the reduction is found to be small within 30 degrees in our calculations, which are not presented here; the predicted entry zenith angle is small. We therefore take a zenith angle of 0 degrees for this first-order estimate.

3. Results and Discussions

The calculated brightness variation for a nucleus having a mass of 3×10^{13} kg is shown in figure 1. This mass value was estimated from a CCD observation by Watanabe et al. (1993) as their lower limit. The calculated energy release is concentrated almost within 1 s, and all of the original mass vanished in the atmosphere. The maximum brightness reached -42.8 magnitudes when we could see it at a distance of 100 km. If the impact occurs at the visible side of Jupiter, we will be able to see its maximum brightness of -10 magnitudes

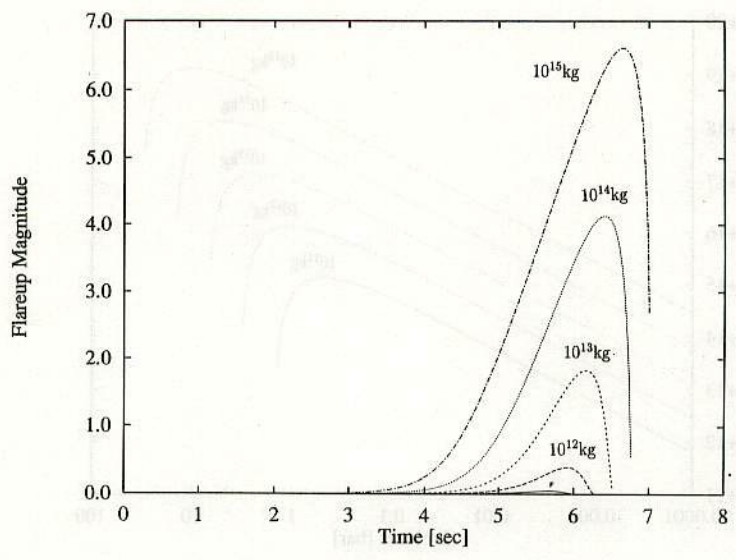


Fig. 3. Reflected brightness variations of the impact through the Galilean satellite Io. The calculated mass range is the same as in figure 2. The origin of the duration time is arbitrary.

ospheric entry, the peak brightness level will shift to a lower pressure level than the above mentioned calculations, and will thus reduce the duration time. A model used to describe such fragmentation should be developed in the future. High-speed photometric observations will be able to discriminate the occurrence of fragmentation. In any case, our estimates are based on the uncertainty of the luminous efficiency. If the masses of the nucleus are accurately estimated by other methods, the luminous efficiency for the large impact could be well determined from photometric observations.

We thank Dr. Watanabe of the National Astronomical Observatory for recommendation to submit this work and for his helpful comments.

References

Atreya, S. K., and Romani, P. N. 1985, in *Recent Advances in Planetary Meteorology*, ed. G. E. Hunt (Cambridge University Press, Cambridge), p. 17.
 Bronshten, V. A. 1983, *Physics of Meteoric Phenomena* (D. Reidel Publishing Company, Dordrecht).
 Carusi, A. 1993, *IAU Circular*, No. 5807.
 Chapman, C. R. 1993, *Nature*, **363**, 492.
 Cook, A. F., and Duxbury, T. C. 1981, *J. Geophys. Res.*, **86**, 8815.
 Marsden, B. G. 1993a, *IAU Circular*, No. 5725.
 Marsden, B. G. 1993b, *IAU Circular*, No. 5801.
 Nakano, S., and Marsden, B. G. 1993, *IAU Circular*, No. 5800.
 Sato, M., and Hansen, J. E. 1979, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1133.
 Walker, J. C. G. 1986, *Icarus*, **68**, 87.
 Watanabe, J., Hirota, Y., and Abe, M. 1993, submitted to *Publ. Astron. Soc. Japan*.
 Zahnle, K. J. 1992, *J. Geophys. Res.*, **97**, 10243.

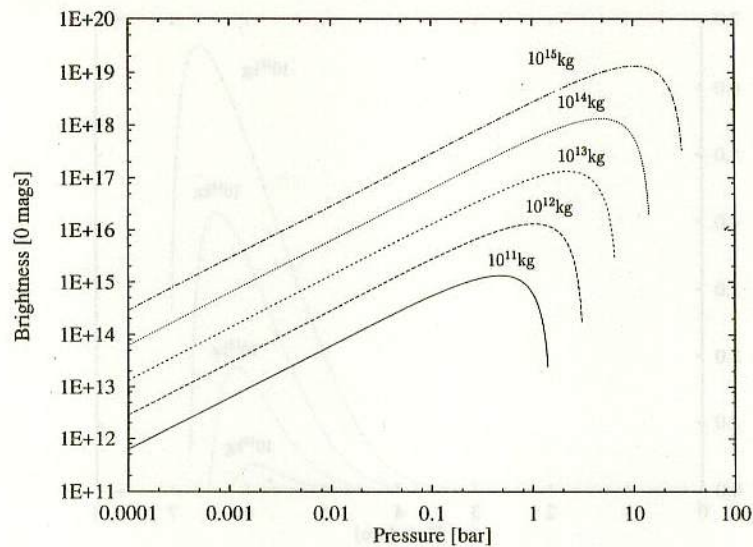


Fig. 2. Brightness variations versus the atmospheric pressure of Jupiter for various nucleus masses. The illustrated mass range is 10^{11} to 10^{15} kg and the brightness is logarithmic.

from the Earth. Walker (1986) and Zahnle (1992) suggested that the effect of shocked gas in front of a larger impactor causes temperature regulation by thermal ionization. Since this effect is not taken into account in our model, our estimates provide upper limits.

Figure 2 illustrates the brightness variations for several masses. The horizontal axis of the figure is the pressure coordinate. The calculated mass range is 10^{11} to 10^{15} kg. These calculations indicate that a nucleus with a greater mass can penetrate deeper into the atmosphere and that no nucleus can survive in the calculated mass range. As a consequence, considerable amount of cometary mass will spread out around the peak brightness level. These brightness peaks are located below a pressure level of 1 bar. In Jupiter's atmosphere the upper-most cloud is thought to be made of ammonia ice. The vertical extent of the cloud is 0.7 to 0.3 bar in pressure scale (Atreya and Romani 1985). These brightness peaks, therefore, will occur under a cloud layer having an optical thickness of 5 or more in the visible wavelengths, and may be obscured by this cloud. However, the impact should be an intense explosion rather than a large fireball, so that the impact should blow off or evaporate the cloud particles. Although cloud obscuration can be neglected, Rayleigh scattering by the atmospheric gas will still remains. The optical thickness τ_R by the Rayleigh scattering for Jupiter's hydrogen atmosphere is

$$\tau_R = 0.0009 \lambda^{-4} (1 + 0.015 \lambda^{-2}) \Delta P, \quad (6)$$

where λ is the wavelength in μm and ΔP is the layer thickness in bars (Sato and Hansen 1979). For a wave-

length of $0.5 \mu\text{m}$, even for a pressure thickness of 10 bar, the optical depth yields only 0.15. We therefore neglected this effect in our calculations at the present time.

The collision of the comet with Jupiter is predicted to take place at the far side of the planet. Although we cannot directly observe the crash, we have a chance to observe the event through reflected light from Galilean satellites. The most inner Galilean satellite, Io, is the best candidate for such a reflector. Io is orbiting around Jupiter at 5.9 Jovian radii. From this distance the impact flash will be seen to be comparable or brighter than the sunlight at Jupiter's orbit in brightness. Therefore, the impact flash through the satellite will be observable from the Earth. Figure 3 shows relative flareups of Io in magnitude for nuclei with various mass. In this estimate, we neglected any phase effect of the satellite, since at this time we have no accurate impact time, and thus cannot predict the position of the satellite during the impact. The calculated brightness variations are determined from the total incident flux, which includes both the flash from the impact and the solar flux. If no obscuration by Jovian clouds will exist, we may be able to see a flash of the satellite caused by the impact of a cometary nucleus greater than 10^{11} kg, even using a small telescope. If the nucleus is greater than 10^{12} kg, the flash can provide sufficient luminosity for spectral observation, which can be used to determine what molecules, atoms, or ions are emitting the light.

These calculations are based on a single-particle model. If a nucleus is fragmented in the atmosphere, which is likely to be the case, or is tidally disrupted before at-

1995/1/8 73th MSS
月惑星研究会 長谷川均

Scenario of the K-impact (K核衝突のシナリオ)

Jul/19/1994

1. Entry flash

地球時刻 → 10:24:02 OASISによる最初のイメージ
に交換後 → 10:24:14 Galileoには写っていない
10:24:19 Galileoによる最初のイメージ

岡山の観測機材

なぜGalileoよりOASISによる2.35micronが先に見えたか?

衝突経度を20811とすると、この頃500km上空ならば地球から観測可能である。500km上空の流星現象として観測されたのではないか。500km上空で、ablateした彗星物質が数100-1000K程度の近赤外線として放射しているのが見えている。Galileoが見たのは、約10秒後であり、これはさらに大気深部に突入した状態を見たものを見ている。60km/sとすると約10秒で木星大気表面に到達する。Galileoの観測では、火球の温度は10000K以上である。

2. Plume flash

10:25:00 OASISによる2次発光開始
Galileoではこの時点を最後に見えなくなっている。
10:25:12 2.35micronで小さなピーク (OASIS)
10:25:58 2.35micronで一旦減光

この時光ったのは何か?

Galileoから観測された発光が終了したところから見え始めている。大気上部に噴出してきたplumeの高温ガスからの発光である。2.35micronでの発光は約1分で終了。温度は数1000-10000K程度。

減光は、ガスが希薄になり、温度も下がったために光学的に薄くなったため。

3. Plume evolution

10:29: 近赤外の発光開始
10:38:37 plumeの発光ピーク

大気上層2000km以上に噴出した彗星核成分を含んだガスが冷却し、10:29ごろに凝縮して固体粒子を形成。それによって、再び光学的に厚くなり再び近赤外線の視界に入る。塵の組成は、Mg-Silicateが有力(?)。固体粒子は弾道軌道を描いて上昇落下。粒子サイズは0.1micron程度。

10:27ごろから、plumeの上部に太陽光が当たり始める。

2.35micronでは熱放射成分であり、温度は、1000-1500K程度。可視光では固体粒子による太陽光の散乱を見ている。その後冷却し、T < 1000Kとなる。

4. Plume settlement

10:41 一旦減光が平坦になる
10:44 再び減光

一旦平坦になる部分は、個体粒子の木星大気再突入による固体粒子の加熱ではないか。13-4km/sの弾道軌道だとよく合う。再突入による温度は数100K程度までにはなった(?)

5. Dark cloud

10:50 可視で暗く、近赤外分子吸収バンドで明るく見える雲として観測された。

これは、成層圏の数mbarレベルに頂上を持つ雲である。温度は200-300K程度まで下っている。

参考資料

「天文月報」原稿

彗星衝突現象の近赤外観測

Near-Infrared Observation of Cometary Impact Phenomena

長谷川 均 (Hitoshi Hasegawa)
(株)アステック (ASTEC, Inc.)

1994年7月16日から22日 (UT)にかけて、分裂した彗星核(シューメーカー・レービー第9彗星)が木星に次々と衝突した。我々は岡山天体物理観測所で近赤外多目的カメラOASISを用いてこの世紀の衝突現象の観測を行った。その結果の一部を速報的に紹介したい。

近赤外波長領域には木星大気に含まれる水素、メタン、アンモニアなどの分子による強い吸収帯が存在する。特に2.3μm付近のメタンの吸収帯は強い吸収を示し、木星本体の反射能を1/1000以下にしてしまう。もし、メタンの吸収の影響を受けない高層大気に衝突によって彗星物質が凝結して塵の雲ができれば、太陽光を散乱して暗い木星本体に対して輝いて見えるだろうというのが我々の予想であった。衝突直前にカルフォルニア工科大学で衝突現象の詳細なシミュレーションを行っていた高田淑子さんから衝突直後に形成されるplumeが木星のリムからイオの火山の噴火のように見えるでしょうという電子メールが届き、plumeの観測にも期待が高まった。

衝突前後の天候は例年ならば梅雨末期であり観測条件は極めて悪いのであるが、梅雨明けが早く連日の晴天に恵まれた。おかげで予定されていた日程全部を消化することができた。分裂したC, D, K核の衝突によるplume、そしてそれらを含む衝突痕を見事にとらえることに成功した。

■ 衝突plumeの観測

我々の観測できた衝突plumeは、C, D, K核である。特に日本では最初の7月17日のC核の衝突は日本時間の午後4時台の観測であり、完全に昼間の観測であった。C核の衝突は直前にいくつかのフィルターでテストした結果、2.35μmのメタンバンドが最も青空の中での観測に適していた。図1がC核衝突の光度曲線である。衝突による発光のトータルフラックスを衛星エウロパとの比で示したものである。C核は、木星の1自転前に最初の衝突があったA核の痕跡の近くに衝突した。このA核の痕跡と合わせた光度となっている。ピークのころは、検出器が飽和してしまい正しい値となっていない。観測中には気がつかなかったが大きなピークの前に小さな第1ピークが見られる。

D核の衝突はC核と同じ日であり、C核の経験から予めNDフィルターをセットして観測に望んだ。しかし、D核の衝突による発光は弱く、わずか数分で我々の視界から消えてしまった。衝突前のSL9が彗星であったころの画像を見る限りC核とD核は同規模の核のように思えたが、組成に違いがあって衝突現象に違いが見られたのだろうか。

日本で見られた最大規模の衝突は7月19日のK核であった。C, D核衝突時の経験か

ら全光度曲線をとらえるためにNDフィルターを必要に応じて交換する体制で挑んだ。図2はK核衝突の光度曲線で、衛星イオとの比になっている。観測の現場でも大きなピークの前の10h25m(UT)ごろに小さなピークがあることに気がついた。データの処理を進めていくと、さらに10h24mごろにも小さいピークが検出された。この最初の発光がガリレオ探査機のグループが公開したK核衝突の発光とほぼ一致した時刻であるのが興味深い。裏側で起こった突入時の発光が大気中での屈折等で表側にも漏れてきたのか、詳しいことはわからない。最後に大きな発光が10分程度継続し、K核の場合は、 $2.35\mu\text{m}$ でイオの32倍の輝きであった。IAUC等に報告された他の核についての観測でも2-6分前に小さな発光が認められているものが多い。

Time (19 Jul. UT)	Relative Flux
1st peak 10h24m12s	0.037
2nd peak 10h25m26s	0.24
3rd peak 10h38m37s	32

表1 K核衝突の3つのピーク

最後の大きな発光については、ハッブル宇宙望遠鏡がとらえたA核やG核のplumeの発達過程とほぼ継続時間が一致することなどから、plumeからの発光(熱放射、太陽光の散乱を含んだもの)と考えられる。その前の小さな発光の原因についてはまだ原因がよくわかっていない。モデル計算によると、衝撃波(shock front)とそれに続くdebris frontの時間差は数秒であり、我々の観測の時間分解能では分離することはできない(1)。また、plumeが観測可能なレベルまで上昇するまでに1-2分程度であり(1, 2)、5分も遅れてplumeが発達しはじめるというのは予想外の現象であった。衝突現象の詳細は、今後様々な波長で行われた観測の結果を総合して解明されることだろう。

■衝突痕跡の観測

衝突の痕跡は、衝突地点が自転によって我々の視界に入ってくると同時に見え始めた。可視光では木星面のどの模様よりも暗く見え、近赤外の分子吸収帯の波長では明るい斑点として見えた。G, K, L核などの大型の衝突痕跡は大赤斑にも匹敵する大きさであった。公開されたハッブル宇宙望遠鏡の画像では、飛散した物質が核の突入方向に吹き返すように物質が広がっている。イオのアルベドを基準にして得られた衝突痕の $2.3\mu\text{m}$ におけるアルベドは、 $2-8 \times 10^{-3}$ 程度である。このアルベドを太陽光の散乱として説明するためには痕跡の雲頂は少なくとも10mbarより上空の成層圏にあると推定できる。痕跡が衝突地点から、5000-10000km以上も広がっていることから、弾道軌道的に広がったとすると10km/s以上の放出速度が必要となる。これは、2kmの核が衝突した場合のガスの広がる速度に一致する(3)。

筆者らは衝突前に彗星の主成分であろう氷の雲の子測をしていたが(4)、その予想は外れ、氷よりもっと反射能の低い粒子の雲が形成された。衝突直後の痕跡の分光観測からは、鉄やマグネシウム、ナトリウム、珪素などの元素の輝線が確認されている。これらは彗星核に含まれた塵が起源となっているのだろう。また同時にアンモニア、メタンなどの輝線も検出されている。これらはおそらく大気下部から巻き上げられた木星大気起源のものだろう。また硫化水素を始めとする硫黄の化合物も検出された。硫黄は木星大気で存在が予測されていてこれまで見つかっていなかった元素である。今回、彗星の衝突によって下層の大気が上層まで巻き上げられたために検出されたのだろう。

衝突の痕跡を形成する固体粒子は上記の分光的に見つかった彗星起源、木星起源の元素、分子を含む物質から構成されているのだろう。衝突直後は解放されたエネルギーで高温のガスの塊となったものが上空で広がるにつれて、断熱冷却、放射冷却によって急速に温度が下がり、凝結し塵を形成したのだろう。粒子の組成、サイズ、量などの推定については、測光データから現在解析中である。

この痕跡は、大気力学的な拡散効果や粒子の落下により、雲の頂上の高度が下がり、光学的にも薄くなり、散乱光強度は次第に弱くなっていくだろう。いつまで成層圏に滞留するかを見届けることは、こうした天体の衝突が過去の地球大気に与えた影響を知る上で重要だろう。

参考文献

- (1) Boslough, M. B., Crawford, D. A., Robinson, A. C., and Trucano, T. G., 1994, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1555-1558.
- (2) Takata, T., O'Keefe, J. D., Ahrens, T. J., and Orton, G. S., 1994, *Icarus*, 109, 3-19.
- (3) Ahrens, T. J., Takata, T., and O'Keefe, J. D., 1994, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1551-1553.
- (4) Hasegawa, H., Takeuchi, S., and Watanabe, J., 1994, *Planet. Space Sci.*, 41, 791-795.

図1

K核衝突の光度曲線(2.36 μm)。エウロパとの相対

図2

K核衝突の光度曲線(2.36 μm)。イオとの相対

1995年度惑星科学会での発表子稿

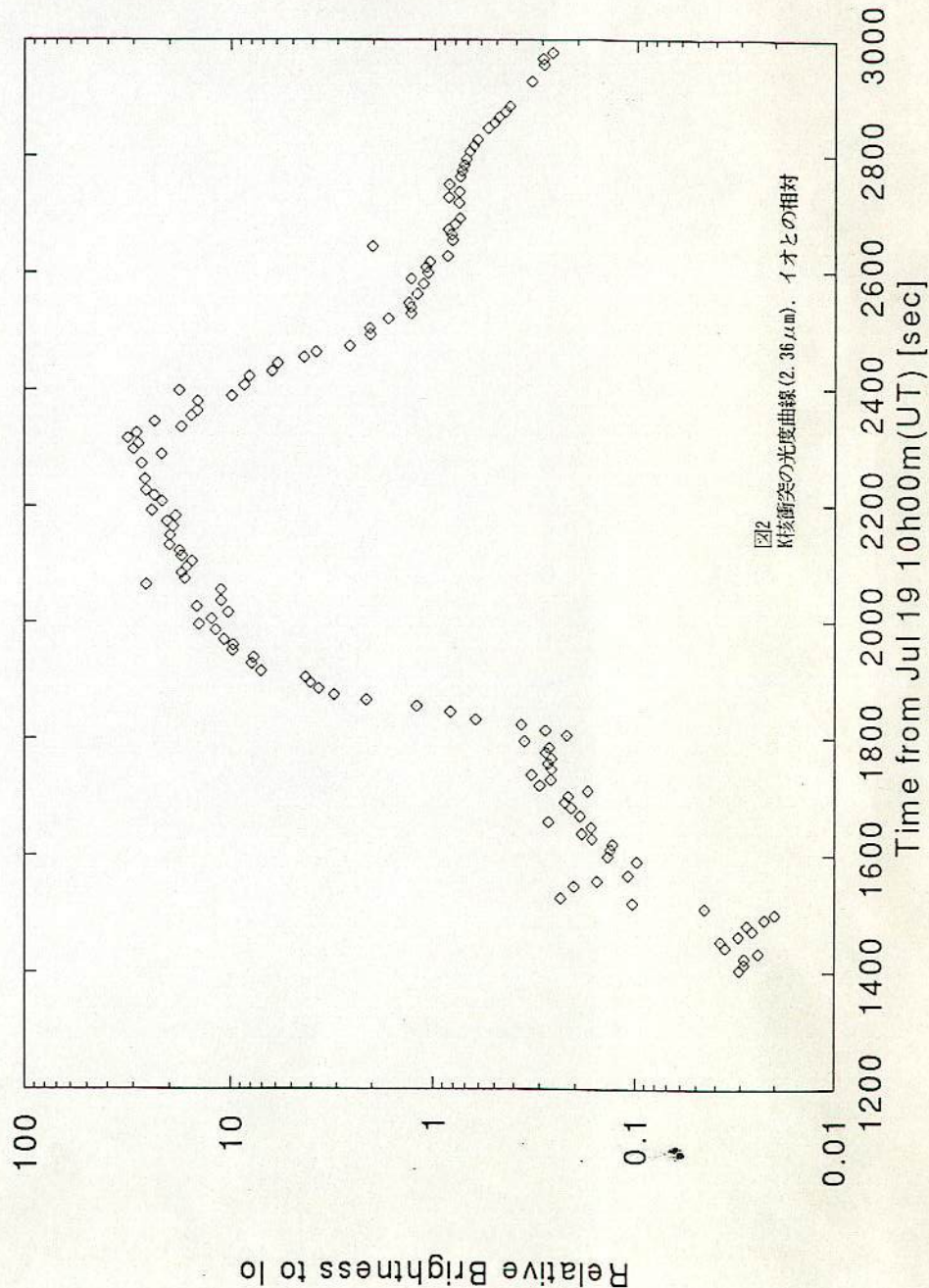
彗星衝突による粒子形成と木星大気への再突入

Grain Formation after the Cometary Impact and Its Re-entry into the Jovian Atmosphere

長谷川均、竹内覚、渡部潤一

Hitoshi Hasegawa, Satoru Takeuchi, Jun-ichi Watanabe

P/Shoemaker-Levy 9彗星の木星に衝突によってplumeが形成され上空3000kmの高度まで達した。2.35 μ mメタンバンドによる光度曲線からplumeの継続時間は1000秒程度であった(Takeuchi et al., 1994)。この間に高温ガスが凝結し粒子を形成したと考えられる。衝突後5分以内の高温状態で凝結したことから、彗星核に含まれていたシリケートダストの成分が再凝結したものが粒子の組成の候補として考えられる。落下した後の粒子の半径は沈降タイムスケールから1 μ m以下、また散乱効率から0.1 μ m以上と推定できる(Hasegawa et al., 1994)。Mgシリケート粒子形成モデルを用いてこのようなサイズの粒子が衝突直後に形成される可能性があることを示すことができた。形成された粒子は弾道軌道を描き、再び木星に落下する。HSTの観測したplumeの高度変化(Hammel et al., 1994)が、衝突1000秒後付近、高度500-1000kmで緩やかになるのは、粒子が木星上層大気と衝突したために減速を受けたためと考えられる。ミクロンサイズの粒子は、この減速のために成層圏の1-10mbar付近で滞留する。これは撮像観測から推定された衝突痕跡の高度と一致する。このときに粒子が大気減速によって被る加熱についても議論する予定である。



S L 9 木星衝突観測のレビュー
流星現象の一種と考えた場合

小笠原雅弘

昨年7月に起こったシューメーカ・レビー彗星(S L 9)と木星の衝突は、世界中の天文台、H S T、Galileo等様々な観測手段であらゆる波長域で観測が行われ現在精力的に解析が進められている。これまでに速報として流れたデータからこの衝突を流星現象として見た場合のレビューを行う。

1、衝突核のサイズ

分裂前----- 4.1±0.6km

各衝突核のサイズ----- 350m < D < 1-2km

(Galileo luminous) (Plume ascent energy)

2、G a s 成分

HST, IUE----OH, CN等彗星固有のガス成分は検出されていない

NTT-----CNの生成レートは1-3E23/sec以下である

3、衝突予報

Yeomans, Chodasらの直前予報より5-7分遅れて衝突が観測された。これは主に位置観測で用いた比較星の誤差による。

4、Galileoによる直接観測

Galileoは、衝突を望む位置から観測を行った。

PPR (偏光計) -----G, H, L の観測を行った

Gの衝突時の最大光輝は木星本体の約15%であった

Lの衝突はGより20%も明るかった

SSI (イメージャ) --K, N, V, Wの観測を行った

Wの最大光輝は木星本体の約1%であった

UVS (紫外分光計) --Gの衝突が07:33:32と07:34:36の2回記録されている

このことはHSTの観測でGが2つに分裂していたことを裏付けているのか?

NIMS (赤外分光計) -G衝突の約6分後に3-4micronsで増光が見られた、これは上層に吹き上げられたejectaが木星大気に再突入したために加熱されたものと解釈されている。1万kmにも及ぶpancake 状の様子はこうして形成されたと考えられている (図1)

5、Plumeの発達と消失

衝突以前に Zahnle, Maclow が発表していた論文から、突入時の光度変化 (図 2) と、衝突で形成される Plume の発達をシュミレートした結果を図 3 に示す。図 3 によれば、衝突の直接の現象 (Entry) と、その後に発達してくる Plume の様子が時間と共に変化していく様子が見て取れる。C1-C4 はモデルを変えて計算したものである。

このシュミレーションを見た後で図 4 を見てもらいたい。この図は国立天文台岡山観測所で長谷川らが観測した K 核のデータである。(ISAS 27th Lunar Planetary Symposium 集録より)

これに HST で観測した可視の G 核の Plume 像を重ねてみよう。(時系列を見るため衝突時刻で合わせてある) 基本的には良く重なることがわかる。詳細には木星の影の影響や、太陽光の当たりかたもあわせて検討をする必要がある。

HST の Plume 像は、ejecta の傘状のエンベロプを見ているように思われる。可視では衝突後 20 分ほどでいったん見えなくなるが、赤外では継続してある程度の輝度が見えている。

こうしてできた衝突痕は 1mbar 程度の高層にあると見られ、水素の吸収バンドやメタンの吸収バンドでは明るく見えている。可視で暗く見えている原因に付いては現在物質 (彗星起源か、木星起源かを含めて)、粒子サイズ等について解析が進められている。

6、Plume で検出された物質

流星スペクトルでもみられるもの

Fe, Si, Mg, Na, Si, K, Ca, O

彗星のスペクトルでもみられるもの

CS, S, CO, HCN, H₂O

木星大気に含まれるもの

NH₃, H₂O, CH₄, H₂S

様々なものが検出されることから、Plume は衝突天体からもたらされた物質と、木星大気の物質が混合した物か？

詳細な検討は今後の解析を待つしかないと考えられる。

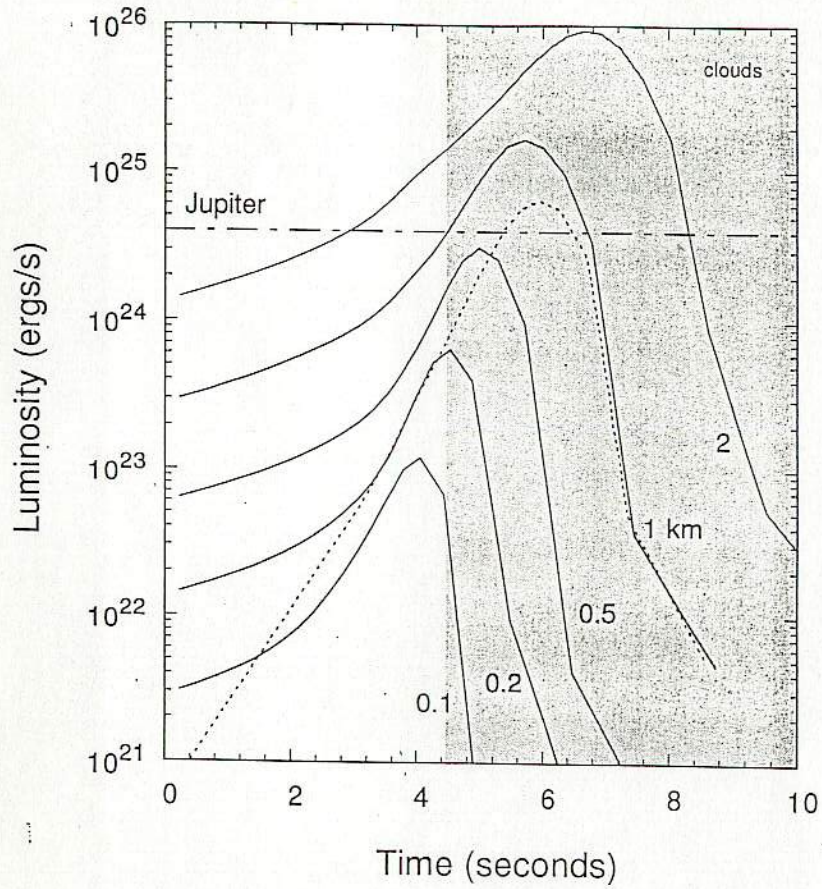


図 2 突入時光度変化 (Zahnle)

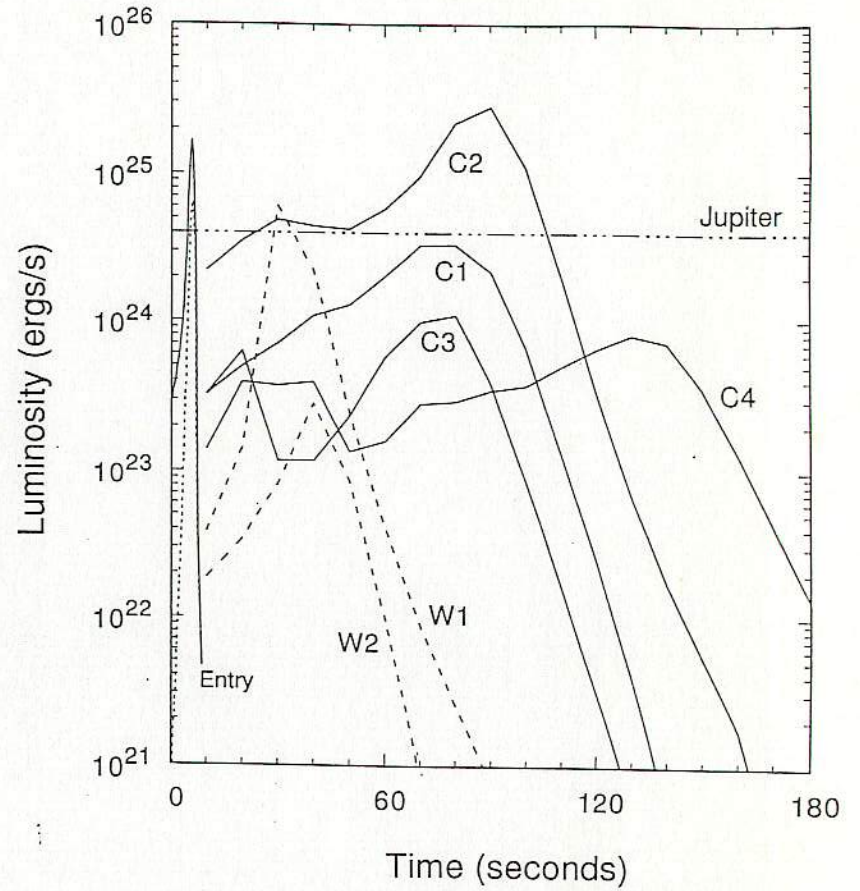


図 3 Plumeの発達 (Zahnle)

Figure 12

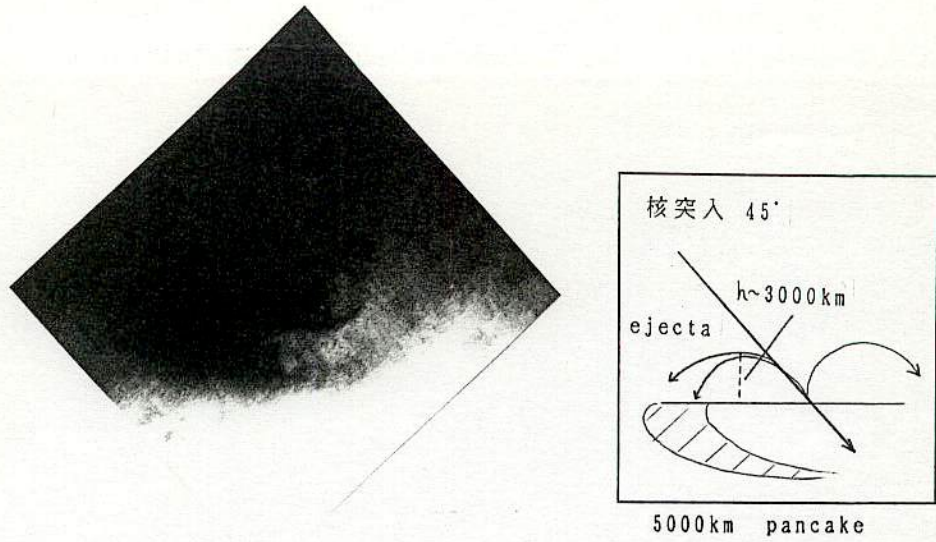
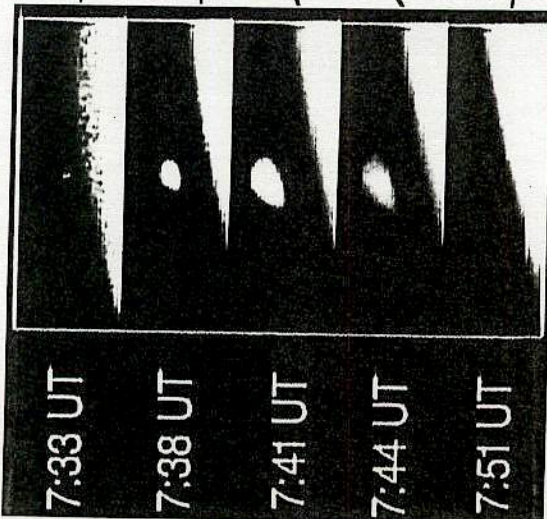
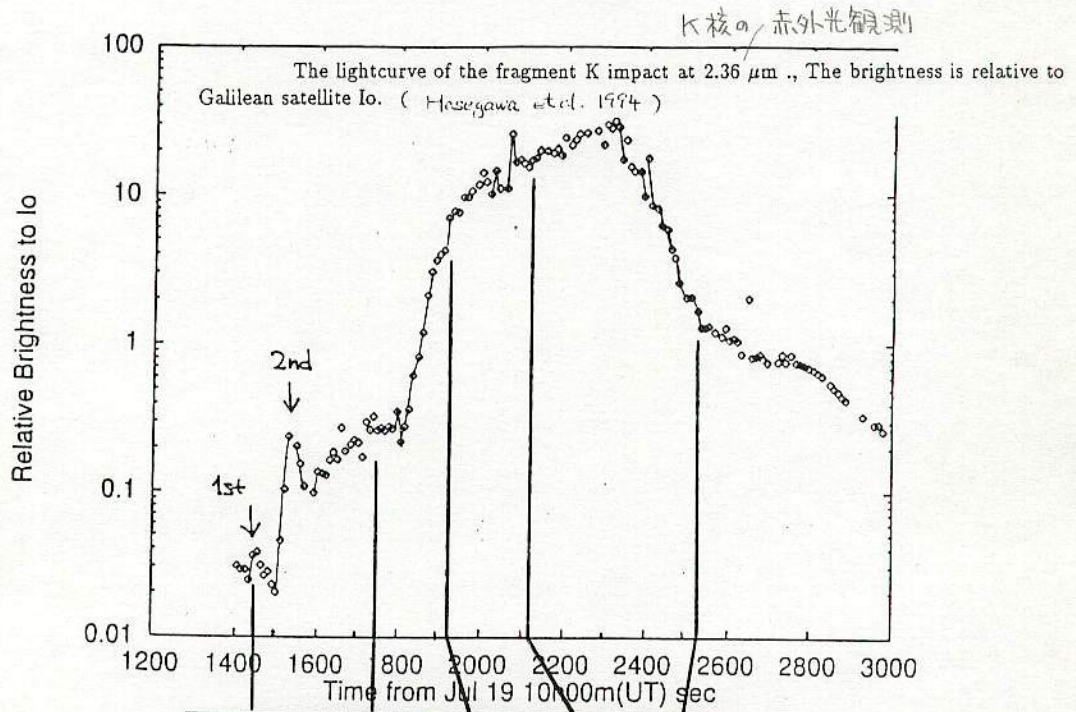


图1 G 衝突痕



HST Visible G-impact Plume

图4

ついに見つかった衝突痕跡

田部 一 志

〈株式会社リブラ 〒242 神奈川県大和市下鶴間 665-8〉

e-mail: tabe@yk.rim.or.jp

渡部 潤 一

〈国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: watanabe@pub.mtk.nao.ac.jp

SL-9 の木星衝突によってできた黒い痕跡は正に驚異的であった。過去における衝突痕跡候補はどれもかなり不確実なものであったが、1690 年に Cassini がとったスケッチにそれらしいものを「発見」した。その経緯、発見の状況、現在知られている中でこの模様が他に比べいかに際立ったものであるかについて述べる。

1. はじめに

シューメーカー・レヴィ第9彗星が木星に衝突して真っ黒な衝突痕跡を残したのはもう2年半前のことになってしまった。衝突によってできた痕跡は木星表面の東西の風(図1)に流されて変形しつつには他の衝突痕跡と混ざりあい $-40 \sim -46^\circ$ にかけて暗い帯を形成した。衝突直後の衝突痕跡はそ

の大きさと三日月形の取り巻きの有無によって a, b, c にクラス分けされているが、これらの痕跡は小さな望遠鏡で見てもはっきり確認することが出来た。これは事前には誰も予想しえなかったことであったが、多くの眼視観測者が望遠鏡を向け独立発見者となった。その黒さはそれまで見られた木星表面模様と比べて極端であり、衛星の影の暗さに匹敵するという感想が多くの眼視観測者によって語ら

木星の帯状流 (1979年から1980年にかけて)

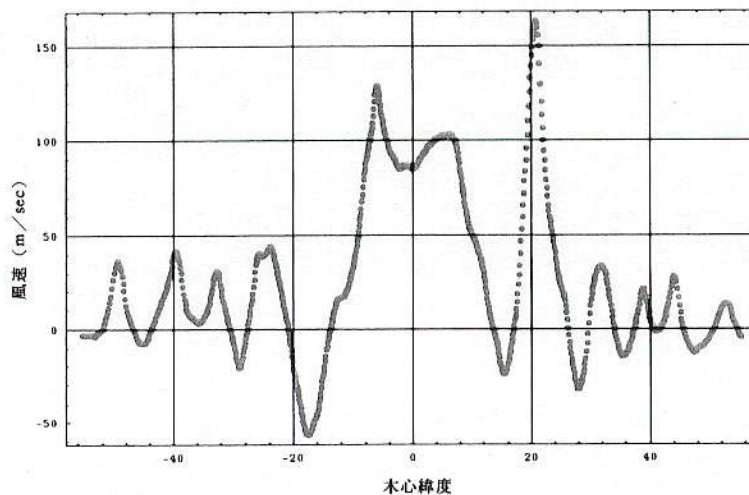


図1 木星の東西流 (Limaye, 1986)

れた。

黒い物質についてはシリケート粒子¹⁾、アモルファスカーボのすず²⁾、HNCポリマー³⁾の説が出されているがどれも決定的ではない。いずれにしても微小天体が木星や土星などのガス型惑星に衝突すると同様の衝突痕跡が残るだろうことは容易に想像できる。

木星や土星の眼視観測が本格的に行われるようになった1870年代以降の記録にはそのような強烈な黒さを持った模様に関する記録はない。木星の表面模様（大気現象）について書かれた文献としてはThe Planet Jupiter⁴⁾が長い間決定版であった。それを上回る大作The Giant Planet Jupiter⁵⁾にも衝突痕跡候補となりうる模様の記述はない。

SL-9の衝突でこんな痕跡が残るのなら過去衝突が起こってればかなり貧弱な望遠鏡でも観測できた筈である。天体望遠鏡が発明された1610年台以降、木星は多くの天文学者、観測者によって最も頻繁に監視され続けた惑星である。

しかしながら、1870年代以前の木星に関してはそれ以降と比べると記録自体が極端に少ない。調査しようとする世界各國の歴史のある天文台を尋ね歩いて調査する方法しか残されていない。この骨の折れる作業を地道にやっていたのが北アイオワ大学にいるThomas Hockeyである。彼は木星へ

の過去の衝突痕跡について既に2編の論文^{6),7)}を発表している。

他にもStephan O'Meara⁸⁾やClark R. Chapman等が土星に現われた暗斑について天体衝突痕跡の可能性を示唆している。しかしながらそのいずれもが1回のみ観測記録しか無かったり、明らかに大気現象と解釈できたりするものであった。表-1にこれまで候補とされた模様の一覧を掲げる。しかし、今となっては再調査しようのないものばかりである。(勿論オリジナルの観測記録が残っていてそれが発見されれば話は別であるが。)候補となっている模様に関して最も否定的な見解を持っていたのがT. Hockey自身であった。

2. これまでの調査

Hockeyは1995年に来日して日本のアマチュア天家のために講演してくれた。

木星の眼視観測を行っている20名程度を相手にしてのものであったが、英語も解りやすいうえに話もうまくなかなか好評であった。話の内容は天体衝突痕跡には否定的なものであったから、私自身も含め多くの観測者はSL-9が衝突したときのような現象は記録されていなかったのだろうと漠然と納得してしまっていた。

不思議なことに数十ある衝突痕跡候補はいずれ

表1 衝突痕跡候補

番号	観測年	観測者	現象	可能性	調査者
1	1664	R. Hooke	暗斑	無し	Hockey(1994) ⁶⁾
2	1665-1713	G. Cassini	暗斑	無し	Hockey(1994,96) ^{6), 7)}
3	1689	G. Cassini	暗斑	小	Hockey(1994) ⁶⁾
4	1778	W. Herschel	暗斑	小	Hockey(1994,96) ^{6), 7)}
5	1785-1788	J. Schroeter	暗斑	小	Hockey(1994,96) ^{6), 7)}
6	1834-1935	J. Madler and W. Beer	暗斑	小	Hockey(1994,96) ^{6), 7)}
7	1834-1857	W. Dawes	白斑	無し	Hockey(1994) ⁶⁾
8	1839	J. South	暗斑	小	O'Meara(1996) ⁸⁾

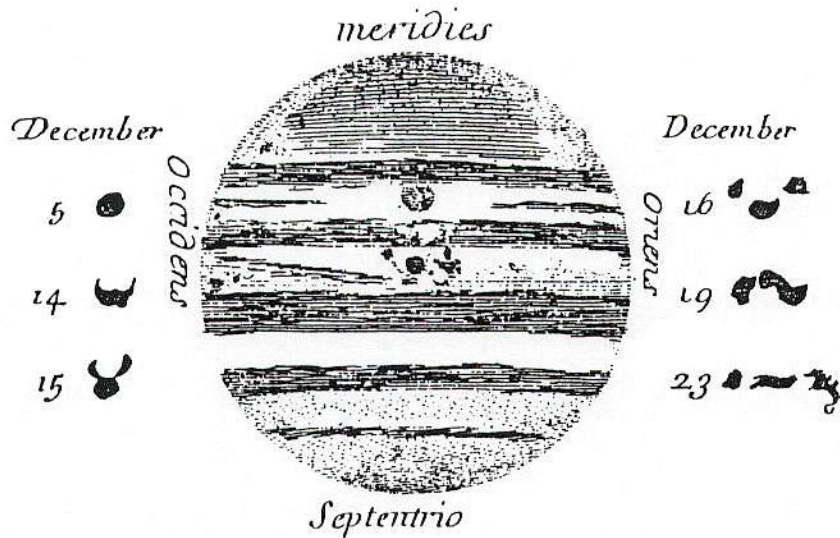


図2 カッシニのスケッチ

も1870年以前のものばかりである。それ以降のものは十分観測され、現在の木星に起こっている細かい大気現象の仲間と解釈できてしまうので必然的に候補とはなり得なかったのであろう。

それ以前のものに関しては観測が断片的であること、観測そのものがあいまいであることなどが手伝って現代的な見方では解釈できないものがあるということはできる。しかし徐々に今後の新発見の期待は薄いと思うようになった。

木星大気の研究にとって数多い表面の渦の消長（発生、消滅、寿命）、渦同士の相互作用、他の模様との相互作用は木星大気の性質を明らかにする重要な手がかりである。しかしながら、本当に興味深い現象は数年～10年に1度くらいしか起こらないので、まさに息の長い観測が必要である。過去の興味深かった現象の観測報告を探して読む方がずっと効率が良い。主要な観測の記録は前述の2冊の著書に全て網羅されていると考えていたがこれは大きな誤りであった。

これらの著者はイギリス人であり、主にイギリスの観測記録に基づいてその著書は編んである。実はイギリス以外のヨーロッパの各国の天文台でも

1870年台以降は熱心に木星の眼視観測を行っており多くの文献が国立天文台の図書館（本館脇のレンガ作りの古い建物）にも収蔵されている。ここ数ヶ月、図書館の古い文献を調査してさまざまな発見をしたのは実に楽しい経験であった。

3. 大赤斑に関する謎

世間一般では木星の大赤斑は300年以上も観測され続けていると信じられている。

これはC.R.Chapmanがカッシニの1600年代のスケッチに描かれているいわゆるパーマネントスポットを現在の大赤斑と同じものではないかと言い出した事に端を発している。それが各教科書にまで孫引きされてしまっている。

カッシニのパーマネントスポットは現在の大赤斑よりやや小さいもの大赤斑と同じ南熱帯に存在し断続的ではあるが1665年からカッシニの死後の1713年まで観測されている（図2）。一方現在の大赤斑の古い記録は1831年までしかたどることが出来ない。途中のブランクが120年もある。パーマネントスポットがそのまま大赤斑になったとするのはちょっと飛躍しすぎではないだろうか？

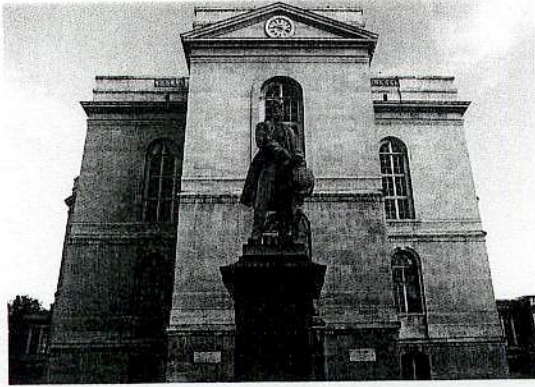


写真1 パリ天文台

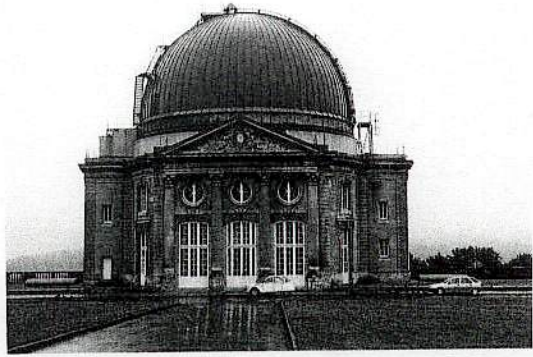


写真2 ムードン天文台

1700年代の観測記録に大赤斑の姿を見い出せれば300年永続説は有望になるが、現在までのところ依然として「発見」されていない。筆者等はパリに行けばこのあたりの資料が何か見つかるかも知れないと常々考えていた。

そんな矢先の1996年7月パリでSL-9の衝突に関する会議が開催された。天文台の渡部潤一さん中村士さん布施哲治さん東大の佐々木晶さん月惑星研究会の堀川邦昭さん神保みちをさんなどの日本人も出席していた。会場はパリ市内からバスで40分程離れたムードンサイトである。会議にはSL-9衝突痕跡の時間変化に関するポスターを出したがもう1つの目的はいうまでもなく18世紀の大赤斑の様子を調べることにあった。ポスター会場と講演場はすぐ隣接していたし、コーヒー等のサービスはポスター会場にあったので多くの人が興味の無い講演の最中はポスター会場でおしゃべりをしていた。(写真1 パリ天文台) その隣が図書室になっており自由に雑誌などが閲覧できるようになっている。

そこで、17～18世紀の木星について書かれた文献を見たいと申し出ると快くコンピュータ端末で検索してくれた。当方があまりいろんなものを検索したがるのでしまいには自分でやれということになって端末を自由に使わせてもらえることになった。ムードンにはあまり古い文献は無く、古いものはパリ

サイトにあるという。

しかし、われわれの目からは十分古そうなものが沢山あったのも事実である。地下に書庫があって雑誌のバックナンバーがあるが、1950年代以前のもは別の建物にある書庫にあるという。どれを見たいということではないので書庫を見たいと申し出たが、嚴重に管理されているらしく駄目だという。まあここはこれで仕方ないと諦めかけた。

会議の中日に最も古い建物の中にある83cmの屈折望遠鏡を見せてくれるという。

歩いて10分ばかりのところであり、直径30mはあろうかというドームの中に望遠鏡は据え付けられてあった。(写真2) この望遠鏡を使って1910年頃有名なE.M.アントニアジが火星を観測し、ローウェル～スキヤパレリの運河説を否定した惑星科学界では由緒ある望遠鏡である。1970年代初めころまでは使われていたが今は使われていない。ドームももう回らなくなってしまっているようである。この建物の1階は, Directeur du documentation planetarie et cometaire de l'Observatoire de Meudon という部屋になっており、ここに惑星と彗星関係の古い映像やスケッチなどが集められていた。さすが眼視観測の伝統を持つ天文台だと関心した。しかし図書室の連中はここの事を知らなかったのだろうか？

早速いって見るとすでに何人かの会議に出席している筈の外部研究者が来ていて火星やら土星の写真調べていた。ムードンやピクドミディだけではなくウィルソン山やリック天文台で撮られた写真まで保存されており、マニア？垂ぜんの資料倉である。木星に関してはアントニアジが1930年代に集めたというスケッチ集があった。アントニアジ自身が模写したものであり、オリジナルはパリサイトにあるという。しかし貴重である。1610年から1850年頃までのおよそ100枚のスケッチをコピーしてもらった。この人達は皆親切である。現在予算要求しておりそれが通ればこれらの資料をWWWに公開することも考えているそうである。日本からも何人か調査に来たらしく海老沢、佐伯、宮本などの名前が出てきた。とくに海老沢氏はミスター火星だと思われる。それだけ頻繁に出入りされていたのだろう。君はミスター木星だねといわれて少し嬉しかった。

ムードンにこれ以上のものはなさそうである。日数にも限りがあるしパリサイトも調べなくてはならない。図書館のおねえちゃんにパリにこれから行くから電話しておいてくれとたのんでパリに向った。パリサイトの図書館は前夜懇親会が行われた場所のすぐ近くにあった。というより、懇親会場にあったガラス張りの戸棚は全て書庫であった。用紙に必要事項を記入して出してもらおうスタイルなので少々面倒臭い。試しにA.S.Williams著 Zenographic Fragments vol. 1 & 2を依頼してみる。すぐに探してくれたが出て来たのは vol. 1のみであった。この本はおそらく世界で始めて書かれた木星表面模様に関する書籍である。中味はMNRASやJBAA等で既に論文になっているものを再録したもばかりのようである。17世紀の観測記録を2~3注文してみる。衛星の位置観測とCassini1692が出てきた。衛星の方は手書きでありが衛星の位置の図の中の木星表面には模様が描かれている。中に大赤斑のようなものもあるが、これがカッシニのパーマネントスポットである。

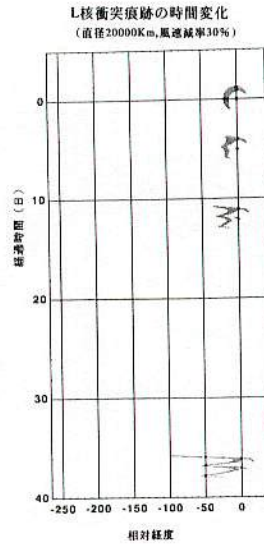


図3 SL-9の衝突痕跡の時間変化

興味深いのは17世紀のSEB(南赤道縞)も濃化、淡化を繰り返していたらしくSEBが濃化するとパーマネントスポットのあたりで渦を形成していることである。これは現在の大赤斑あたりのSEBに見られるRed Spot Bayと呼ばれるものと全く同じものであるようだ。両者は物理現象としては同じものである事を再確認するに足る発見であると思う。

Cassini1692の方は図2のスケッチが掲載されていたものであるが、文字は全て活字であった。あたかも謄写版で印刷したかのように文字のかすれている箇所もある。これを“発見”してスケッチを見た瞬間、アントニアジが引用していたあのスケッチだとすぐにわかった。300年前のフランス語の詳細については分からないのでコピーを採らせて欲しいと頼んだがあっさり断られた。写真も採らせてくれない。スケッチはアントニアジが引用したものが印刷物になっているので、文章の主な部分(ほとんど全部)を筆記することにした。筆記している間同行してくれた堀川君は別の文献を探していたが、めばしいものは見つからなかった。閉館まぎわ

まで粘りほとんど全てを写し終えホテルに戻った。

4. ほんとうに衝突痕跡か？

SL-9の痕跡の観測から衝突によって出来たプルーム内での黒く見える粒子は1-200 mb レベルに浮遊していたものと考えられている。そして次のようなことが分かっている。

(1) SL-9の衝突痕跡は成層圏にあつて(1-200 mb レベル) 基本的には対流圏の風の分布を減衰させたような東西方向の風に乗って変形している。風のパターンがそのまま形の変化となっている。(図3)

(2) しかしながらこの風は対流圏上部の雲頂で測られた風速分布(ボイジャーの観測)とは必ずしも一致しない。ボイジャーの測定した150 mbと270 mbの南北の温度分布は成層圏(上空では)東西方向の風を抑制する方向に働くことが予想されていたが、SL-9の衝突痕跡では風速が30~50%減衰しているらしい。

(3) 事前に予想された渦が発達は見られなかった。

すなわち木星成層圏に単純に黒い粉をまいたのと同じ振る舞いをしていたらしい。ボイジャーの観測した風速を減衰させたような結果になったのは、温度風の関係

$$\partial u / \partial z = R / (2a \Omega \sin \theta) \cdot \partial T / \partial \theta \dots \dots \dots (1)$$

によって、東西の風速が低減されているからであろう。このことは以前のFlaser⁹⁾によって予想されていたことでもあった。もしもCassiniのみた斑点が赤道での南北シアーによって広がったものであるとすれば、当然同じような低減を示している筈である。

またBeebe¹⁰⁾も指摘しているように対流圏から成層圏まで伸びた渦の作用による変形も無視できない。しかしながら、渦による変形はそれを示してくれるトレーサーがあつてなおかつ変形を与えている渦の存在が明らかな場合始めて可能になる議論である。Cassiniの斑点も当然周囲の渦による変形を受けているはずであるが、これ以上の議論は現在

のところできない。また、BeebeがE. J. Reeseからの私信(1996)として引用している重要な用件として、痕跡によって生じた模様であるならばその模様がリム(縁)またはターミネーター(明暗境界線)付近にある場合でも他の模様よりコントラストが際立って見えることがある。SL-9の痕跡でもそうだったが成層圏まで伸びた模様がイラジエーション(irradiation)という現象を起こしてそれだけ際立って見えることが古くから知られている。Cassiniはそのあたりについては何も記述していない。これは元々強烈にコントラストの強いものであったろうから特筆に値しないと考えたのかもしれない。

会議が終わって部屋に戻っていた渡部さんにスケッチを見せるとこれはNatureクラスの発見かもしれない。急いで論文にして先取権を取ってしまうということになった。たまたま筆者と堀川氏がポスター発表していた内容が木星の東西流によるSL-9衝突痕跡の時間変化に関するものであった。同じ手法でCassiniの斑点の時間変化をシミュレートしてみることが可能である。すぐに結果は出た-5°付近に直径6°の円形の痕跡を作りボイジャーが測定した風のプロファイルを30%ほどに減衰させて応用するとほぼピッタリになる。30%という減衰率もSL-9の場合とびつたり合致する。やはり、そうだったのかとの思いを強くした。このシミュレーションには渦の効果も拡散の効果も入っていない。それでもSL-9衝突痕跡の大まかな形状変化を追うことには成功している(図3)。また元になった東西流はボイジャーが測定したもの¹¹⁾である。パリでLimaye自身から聞いた話によると、ボイジャーの測定値とガリレオの測定値は17年の時間が経過しているが1%以内で合致しているという。この100年間東西の風について変化した例はごく特殊な場合を除いて知られていない。特に赤道地域には変化は全く検出されていない。現在の値が300年前に通用するか否かは誰にも分からないが、少なくともこの100年に関しては同じであるので同じと考えて差し支えないと思われる。

Cassini 自身はこの斑点について次のようなことを記している。

- (1) 突然丸い斑点として現われたので驚いた。
- (2) 非常に黒かった。
- (3) 太陽黒点のようなものではないか？

これらのいずれもが衝突痕跡である事を肯定している。また18日目以降の観測については何も記されていないが、図1の南熱帯に見られるパーマネントスポットの観測はその後も連続して行っている。1691年の木星の衝は11月だったので1692年の4月頃まで観測可能な時期が続いた筈である。何も記述がないということは消えてしまった(少なくとも見えなくなった)と考えても良いだろう。SL-9の衝突痕跡が地上の眼視観測者によって追跡されたのは短いものでは10日、長いもので35日程度であった。その後は他の痕跡と混ざり会って暗いベルト状となり約1年後まで見え続けた。

以上のように状況証拠としてはほとんど衝突痕跡である。ここまではっきりした証拠の揃っているものは他に例がない。一方1000年に1度だと言われていた衝突の頻度であるがもっと頻繁に衝突は起こっているのではないかという説¹²⁾もあり、実際には300年に1度くらいの割合いで起こっているのではないかと思われる。

図4は筆者の友人の高部哲也氏が描いてくれたCassiniの痕跡当時の木星の想像図である。模様のコントラストは極力本物に近い感じになっていると思う。今後このような「発見」ができるかどうか分からないが、少なくとも17世紀の大赤斑についてはもう少し探してみるつもりである。発見できても発見できなくても結果については報告したいと思う。

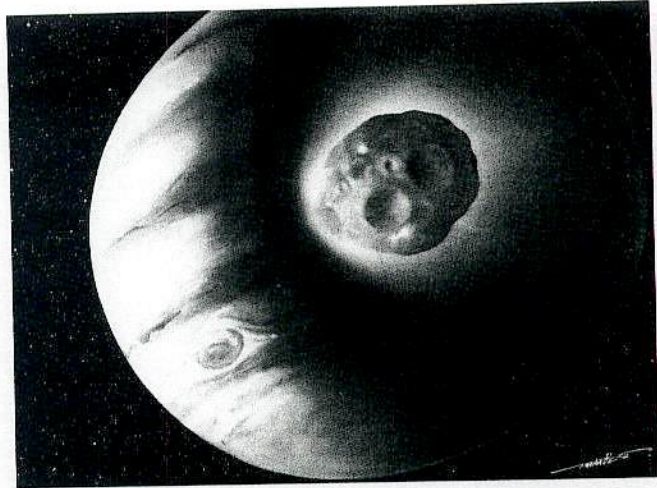


図4 カッシニが衝突痕跡を見た当時の想像図(高部哲也画)

参考文献

- 1) Hasegawa H., et al. 1996 Icarus 121, 311
- 2) Hofner S., et al. 1997 Icarus, in press
- 3) West R., et al. 1995 Science 267, 1296
- 4) Peek B.M. 1958 The Planet Jupiter (Faber and Faber, London)
- 5) Rogers J.H. 1995 The Giant Planet Jupiter (Cambridge University Press, Cambridge)
- 6) Hockey T. 1994 Earth Moon and Planets 66, 1
- 7) Hockey T. 1996 Planet Space Science 44, 559
- 8) O' Meara S. 1996 Sky and Telescope, 92,98
- 9) Flaser F.M. 1986 Icarus 65, 280
- 10) Beebe R.F. 1996 in IAU Coloq. 156 (Cambridge Univ. Press, Cambridge)
- 11) Limaye S.S. 1986 Icarus 65, 335
- 12) Kary D.M. and Dones L. 1996 Icarus 121, 207
- 13) Nakamura T., Yoshakawa M. 1995 Icarus 116, 113

Discovery of Impact Spot in 1690 on Jupiter Isshi TABE

665-8 Shimo-Tsuruma, Yamato-City, Kanagawa 242
JAPAN

Abstract

The formation of scars caused by the collision of Comet Shoemaker-Levy 9 on surface of Jupiter was a marvelous event exactly. Although many candidates of past impact scars have been still ambiguous, we discover the record of reliable spot in a drawing of J.D.Cassini in 1690. We refer to the circumstance of this discovery and how this spot has stronger reliability than other known candidates.

木星での流星

田部一志、三品利之、米山誠一、山崎明宏、立川正之、青木和夫、市丸雅行、渡部潤一

Summary

2010年8月20日 18h 22m 12s 木星面での位置 CM2=159° 地理緯度+21.1° に閃光。
継続 1.3秒 最大光度 6.2 ± 0.1 等 温度 4300-4400K impactor の大きさ 4.2m以下

Introduction

木星に天体が衝突する現象は、1979年3月、1994年7月、2009年7月、2010年6月に観測された。(Cook and Duxbury 1981, Sanchez-Lavega et al 2010, Hammel et al. 2010, Hues et al. 2010)

SL-9を除いて impactor が何か判っていない。

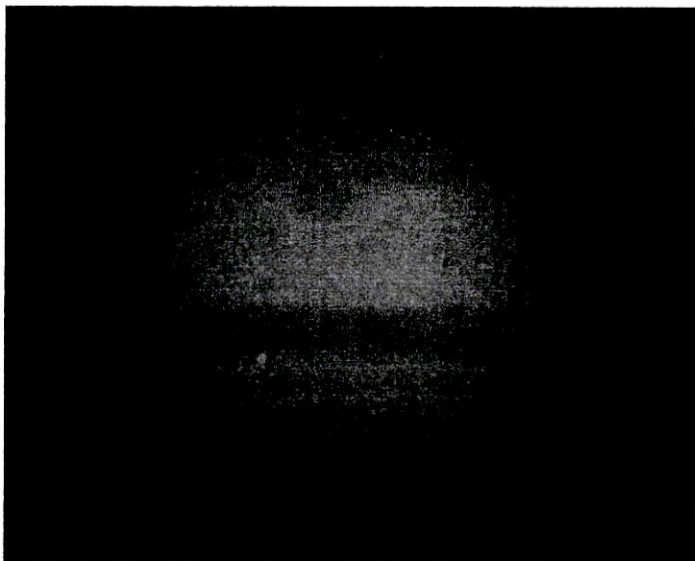
Observation and reduction

日本で Amateur Astronomer 3名が撮影に成功。

2010年8月20日 18h 22m 12s (UT)

Observer	Location	Telescope	Camera
Masayuki Tachikawa	Kumamoto City, Kumamoto	15cm Refractor	Phillips Toucam2
Kazuo Aoki	Setagaya, Tokyo	22.5cm Schmidt-Cassegrain	Phillips Toucam2
Masayuki Ishimaru	Toyama-city, Toyama	12.5cm Refractor	DFK21AU04

3名の観測者+遅れて報告のあった、和歌山県有田市の〇市も観測していたことが判明。
直線距離 熊本-世田谷 880 km 熊本-富山 730 km 世田谷-富山 240 km



2010 Aug.20 18h22m12s(UT)
CM1=336.7 CM2=165.2
Masayuki Tachikawa, Kumamoto

This image shows south is up.

パララックスが無いので木星表面での閃光と断定できる。

3つの観測の中で最も SN の良い M.Tachikawa の画像を測定

1 最大光度の決定

方法

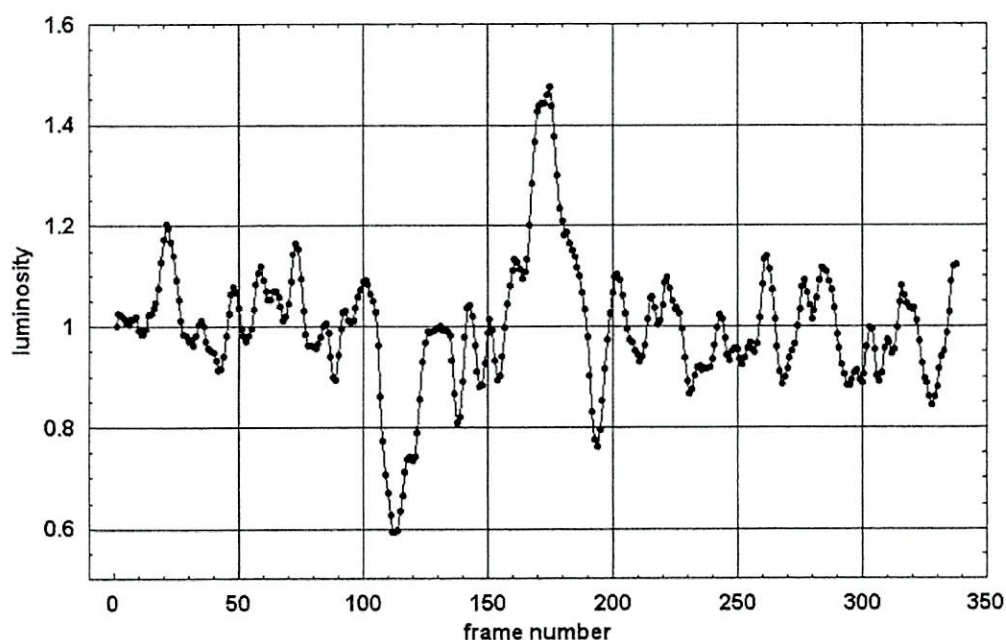
測定は下記の3画像を使用しています。

- フレーム番号 732 1枚の BMP 画像
- フレーム番号 730~734 をスタック処理のみした画像
- フレーム番号 730~734 をスタック処理+wavlete 処理した画像

測定方法の概要は下記のとおりです。

- ステライメージを使用
- 前回の木星面輝度測定と同様の方法で、輝点左右の表面輝度を測定。その中間値を発光点の表面輝度に採用。
また、その点の輝度を 4.95 等/arcsec² に設定。
- 発光点をピクセル半径 3 画素(37 ピクセル)で測定。
下記の値を引いた値を、火球の総光量とした。
 - ・ ダーク部分の平均輝度(37 ピクセル換算値)
 - ・ 木星表面輝度(37 ピクセル換算値)
- 火球の総光量を、表面輝度(4.95 等/arcsec² に相当する光量)で輝度比を算出して、4.95 等を基準に等級を算出した。
- 結果は、6.1~6.3 等 (6.2 等±0.1 等)

2 光度曲線



3 温度

RGB の強度から 4300-4400K (Hueso et al 2010 の結果と奇しくも一致する。)

Result

m_{∞} : 衝突天体の質量 V : 衝突速度 (64 k m/s)

τ : 発光効率 = 5.4×10^{-6} [mag kg⁻¹ m⁻² s³]

I : 火球の絶対光度 (100 k m, 0mag の倍数)

$$m_{\infty} = \frac{2}{\tau V^2} \int I_{PR} dt$$

64 k m/s は Cook and Duxbury (1981) より

同じ計算方法で推定した値 (1, 4, 5) 参考値 (SL-9, 2009 年の痕跡のみのイベント)

	衝突日時	観測者	絶対等級(100k m)	質量	密度(仮定)	直径	Reference	備考
1	1979 年 3 月 5 日	Voyager 1	-12.5 等	11kg	2g/cm ³	0.2m	Cook and Duxbury 1981	火球
2	1994 年 7 月 19 日	OA0				<1000m	Watanabe et al 1993	SL-9
3	2009 年 7 月 23 日	-	-	-	2.5g/cm ³	200-500m	Orton et al 2011	痕跡のみ
4	2010 年 6 月 5 日	Go and Wesley	-25.2 等	$5 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ kg	2g/cm ³	8~13m	Hueso et al 2010	火球
5	2010 年 8 月 20 日	立川、青木、市丸	-22.4 等	7.6×10^4 kg	2g/cm ³	4.2m	This work	火球

5 のイベントは、地球からの光点の明るさ 6.2 等級 (1 秒間) = -22.4 等級 (100 k m) (木星-地球の距離 4.1006AU) $I=8.50 \times 10^8$ [mag 秒]

RGB 分解による温度の推定 4400K (くしくも Hueso2010 と同じ)

Reference

Cook A.F. and Duxbury T.G. 1981 JGR 86,8815-8817

Hammel H.B. and 11 authers 2010 ApJ 715 L150-L154

Hueso R. and 16 authers 2010 ApJ 721 L129-L133

Orton G.S. and 26authers 2011 Icaus 211 587-602

Sanchez-Lavega A. and 15 authers 2010 ApJ 715 L155-L159

Watanabe J., Hirota Y., and Abe, M 1994 PASJ 46, L1-L4