第16卷 第4期
1996年 10月

空间科学学报
CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE

Vol.16, No.4
Oct., 1996

Shoemaker－Levy 9 彗星撞击木星的流星物理学*

胡 中 为　初 一
(南京大学天文系，210093)
武 银 根　黄 克 谅
(南京师范大学物理系)

摘　要

本文从流星物理学的基本方程出发，导出 Shoemaker－Levy 9 彗星撞击木星时的速度、质量损失、电子线密度、能量释放率随高度的分布公式；采用合理的参数，作了一系列计算，并与观测资料比较，进行一些讨论.

关键词　彗星，木星，流星，撞击事件

一、引　言

Shoemaker－Levy 9 彗星(SL9)分裂的 20 多个碎块各成为子彗星[1]，于 1994 年 7 月 16—22 日依次撞击木星[2]. 这为研究彗星、木星及灾难性撞击过程提供了机遇. 事件前，提出很多推测和探讨[3—5]. 观测结果表明，提出的模型没有完全正确的，一些问题没有解决[6—8].

SL9 的子彗星在木星大气中陨落，原则上会产生类似于地球大气中的流星现象. 然而，由于陨落体及陨落环境不同于地球上的流星，因而其陨落问题复杂. 不同模型的结果有很大差别. 例如，关于子彗星的穿入深度，Sekanina 的结果是 0.3 bar，Yabe 等是大于 10 bar，Takata 等是几百 bar，Low 和 Zahnle 用流星物理变截面(饼状)分析模型及天体物理流码 ZEUS 数值模型计算出子彗星能量释放分布及空暴高度，两种模型的结果基本一致[5]. 因此，流星物理分析模型是很重要的.

本文从流星物理学的基本方程出发，导出子彗星陨落中的速度、质量、光度、电子线密度及能量释放率随高度变化的分析式；根据有关资料，选取合理的参数，进行一系列计算；将计算结果与有关观测资料比较，作一些讨论.

二、彗撞木的流星物理学问题

SL9 的子彗星撞击木星，实质上是个特殊的流星物理学问题，其基本方程是[9,10]

* 国家自然科学基金资助项目.
本文于 1995 年 9 月 8 日收到，修改稿于 1996 年 2 月 5 日收到.

$$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t=-\Gamma AM^{-1/3}\rho\delta^{-2/3}v^3, \tag{1}$$

$$\mathrm{d}M/\mathrm{d}t=-\Lambda AM^{2/3}\delta^{-2/3}\rho v^3/(2Q), \tag{2}$$

$$I=-(\tau v^2/2)\mathrm{d}M/\mathrm{d}t, \tag{3}$$

$$\alpha=-(\beta/\mu v)\mathrm{d}M/\mathrm{d}t. \tag{4}$$

式中，δ，M，v分别为子彗星的密度，质量和速度，$A=SM^{-2/3}\delta^{2/3}$为形状因子(S为截面)，Γ为拖曳(阻力)系数，Λ为热转移系数，Q为单位质量的烧蚀能量，I为流星光度，τ为发光系数，α为电子的线密度，μ为流星原子的平均质量，β为电离系数，ρ为木星大气密度．假定木星大气是等温的，则$\rho=\rho_0\exp(-h/H)$．H为标高，ρ_0为$h=0$处密度．假定子彗星轨迹是直线，且与垂直方向交角是θ，则有$\mathrm{d}h/\mathrm{d}t=-v\cos\theta$．引入形状－密度因子$K=\Gamma A\delta^{-2/3}$及烧蚀系数$\sigma=\Lambda/2\Gamma Q$．假定子彗星陨落中，$\Gamma$，$\sigma$，$A$不变，则由上述方程可导出积分关系

$$E_i(\sigma v_\infty^2/6)-E_i(\sigma v^2/6)=[2KH\rho_0/(M_\infty^{1/3}\cos\theta)]\exp(\sigma v_\infty^2/6-h/H), \tag{5}$$

$$M/M_\infty=\exp(\sigma v^2/2-v_\infty^2/2). \tag{6}$$

式中，M_∞和v_∞是子彗星进入木星大气时的初始质量和速度，$E_i(x)$是指数积分函数，$E_i(x)=\int_{-\infty}^{x}(e^x/x)\mathrm{d}x$．假定$\tau$是常数，$\beta=\beta_0 v^{3.42}$($\beta_0=4.36\times10^{-24}$)[9]，则

$$I=M_\infty v^5\tau\sigma\cos\theta\exp(-\sigma v_\infty^2/2+\sigma v^2/3)[E_i(\sigma v_\infty^2/6)-E_i(\sigma v^2/6)]/(4H), \tag{7}$$

$$\alpha=M_\infty\beta_0 v^{5.42}\sigma\cos\theta\exp(-\sigma v_\infty^2/2+\sigma v^2/3)[E_i(\sigma v_\infty^2/6)-E_i(\sigma v^2/6)]/(2\mu H), \tag{8}$$

$$t/t_m=2H/\cos\theta\int_{v_m}^{v}(v^{-2}\exp(\sigma v^2/6)/[E_i(\sigma v_\infty^2/6)-E_i(\sigma v^2/6)])\mathrm{d}x. \tag{9}$$

其中，t_m和v_m分别是I极大的时刻和速度．v_m满足方程

$$[(2/3)\sigma v_m^2+5][E_i(\sigma v_\infty^2/6)-E_i(\sigma v_m^2/6)]=2\exp(\sigma v_m^2/6) \tag{10}$$

而α极大时的v_m值满足

$$[(2/3)\sigma v_m^2+5.42][E_i(\sigma v_\infty^2/6)-E_i(\sigma v_m^2/6)]=2\exp(\sigma v_m^2/6). \tag{11}$$

子彗星能量释放率为

$$\mathrm{d}E/\mathrm{d}t=(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)(-Mv^2/2)=-(v^2/2)\mathrm{d}M/\mathrm{d}t-Mv\,\mathrm{d}v/\mathrm{d}t=(1+\sigma v^2/2)\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$$

$$=M_\infty v^3(1+\sigma v^2/2)\exp(-\sigma v_\infty^2/2-\sigma v^2/3)\cos\theta[E_i(\sigma v_\infty^2/6)-E_i(\sigma v^2/6)]/(2H). \tag{12}$$

$\mathrm{d}E/\mathrm{d}t$极大时的v_m值满足方程

$$[(2.5\sigma v_m^2+3)+(2/3)(1+\sigma v_m^2/2)\sigma v_m^2][E_i(\sigma v_\infty^2/6)-E_i(\sigma v_m^2/6)]$$

$$=2(1+0.5\sigma v_m^2)\exp(\sigma v_m^2/6). \tag{13}$$

令子彗星在此极大时的动能是E_m及能量释放率为$(\mathrm{d}E/\mathrm{d}t)_{\max}$，则能量释放时标为

$$\tau_m=E_m/(\mathrm{d}E/\mathrm{d}t)_{\max} \tag{14}$$

当$\tau_m<1$ s，则子彗星爆碎(空暴)．

三、参数选取和计算结果

木星大气无确定下界，参考木星资料[11]，取气压 $p_0=1$ bar 的高度为 $h=0$. $\rho_0=0.00015\text{g}/\text{cm}^3$，中纬大气标高 $H=30\text{km}$. 根据SL9轨道资料，取 $v_\infty=60\text{km}/\text{s}$ 和 $\theta=45°$. SL9各子彗星直径的上限为 0.64—4.06 km[12]. 参考流星观测结果[10]，取 $A=1.21$，$\Gamma=0.5$，σ 取正常彗星物质的平均值 $0.10\,\text{s}^2/\text{km}^2$（相应密度 $\delta=0.75\,\text{g}/\text{cm}^3$）及密的彗星物质平均值 $0.08\,\text{s}^2/\text{km}^2$（相应密度 $\delta=1.0\,\text{g}/\text{cm}^3$）. 考虑到SL9各子彗星的直径范围，取 $M_\infty=10^{14}$，10^{15}，10^{16}，10^{17}g 几种情况. 考虑到的流星发光主要取决于非挥发性"尘"成分及石陨石的 τ 值，取 $\tau=1\times10^{-5}$ 和 $\mu=4.2\times10^{-23}$g.

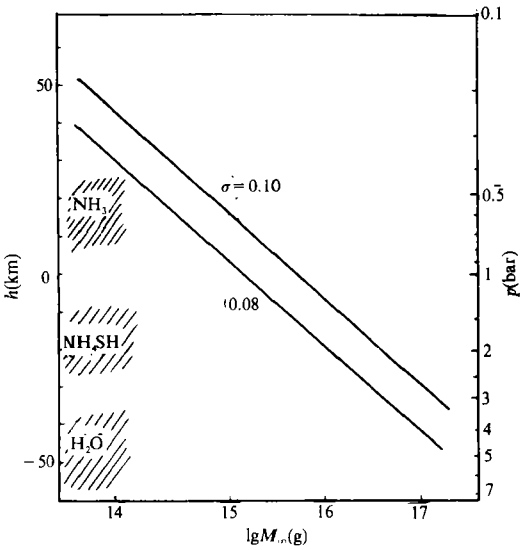


图1　子彗星初始质量与空暴高度关系

Fig.1　Relation of airburst height to fragment's initial mass

利用上述的较合理参数，由(5)式算出彗星的速度随高度的变化，由(6)式算出其质量随速度的，从而随高度的变化. 实际上，若其他参数不变，由(5)式可见，当 M_∞ 增大 f 倍，相应的高度减少 $H\ln(f^{1/3})$.

由(10)，(11)，(13)式的计算结果表明，对于取定的 σ 值，光度，电子线密度及能量释放率三种极大的 v_m 值准确到0.01km/s是相同的，即：取 $\sigma=0.08\,\text{s}^2/\text{km}^2$ 时，$v_m=59.75\text{km}/\text{s}$；取 $\sigma=0.10\,\text{s}^2/\text{km}^2$ 时，$v_m=59.80\,\text{km}/\text{s}$. 相应地，$M/M_\infty=0.3012$. 表1

表1　SL9子彗星的质量、光度、电子线密度及能量释放率极大值

M_∞ (g)	σ (s^2/km^2)	R_∞ (km)	I_{max} (J/s)	α_{max} (ele/cm)	$(dE/dt)_{max}$ (J/s)
10^{14}	0.08	0.2879	1.112×10^{15}	1.620×10^{29}	1.120×10^{20}
	0.10	0.3169	1.116×10^{15}	1.626×10^{29}	1.222×10^{20}
10^{15}	0.08	0.6204	1.112×10^{16}	1.620×10^{30}	1.120×10^{21}
	0.10	0.6828	1.116×10^{16}	1.626×10^{30}	1.222×10^{21}
10^{16}	0.08	1.3365	1.112×10^{17}	1.620×10^{31}	1.120×10^{22}
	0.10	1.4710	1.116×10^{17}	1.626×10^{31}	1.222×10^{22}
10^{17}	0.08	2.8794	1.112×10^{18}	1.620×10^{32}	1.120×10^{23}
	0.10	3.1092	1.116×10^{18}	1.626×10^{32}	1.222×10^{23}

给出(7)，(8)，(12)式的计算结果，其中初始半径 $R_\infty=(3M_\infty/4\pi\delta)^{1/3}$. 计算结果表明，$I(h)/I_{max}$ $\alpha(h)/\alpha_{max}$ 以及 $dE/(dE/dt)_{max}$ 在误差 0.2% 内是相同的. 由(14)式算出，$(dE/dt)_{max}$ 时的 $\tau_m=0.48$ s，因此发生空暴. 图 1 给出子彗星初始质量与空暴高度或相应气压 $p(h)=p_0\exp(-h/H)$ 的关系.

四、讨论与结论

在 SL9 各子彗星中，G 和 Q 是最大的，由观测资料得出其直径上限为 4.06km[12]，若取 $\delta=1.0$ g/cm^3，则 $M_\infty=3.5\times10^{16}$ g. 按本文计算结果，它们的空暴时尚不足以穿入到 H_2O 云层深度，而仅穿过 NH_3 和 NH_4SH 云层. Hubble 太空望远镜观测到 G 撞击木星处的光谱中有 NH_3, S_2, CS_2, CS, H_2S, S^+，它们可能来自木星大气的含硫分子，表明子彗星穿入气压 1 — 2 bar 高度的 NH_4SH 云层：但含氧分子，尤其是 H_2O 却缺乏[13]，这些证据有力地支持本文的结果. 由此推断 SL9 的最大子彗星的初始质量约 10^{16}g，可能是较贫含 H_2O 的密彗星物质，其半径小于 1.5km. 小的子彗星甚至在木星的云顶之上就已空暴.

关于子彗星撞击(空暴)闪光亮度也有不同的估算[4]. 简单计算得出，木星的总光度 $L=1.43\times10^{18}$J/s. 当 $M_\infty=10^{16}$ g 的子彗星空暴时，$I/L=7.7\%$. Galileo 飞船直接观测到子彗星 H 和 L 撞击的闪光亮度峰为 $I/L=4\%$ 和 2%. 若取它们的直径分别为 2.5 和 2.2km，利用(10)式可算出 $I/L=4.9\%$ 和 3.4%，这与观测符合较好. 曾有人提出木卫可因反射撞击闪光而增亮. 若取 $I_{max}=1.1\times10^{17}$J/s，简单地估算得出，木卫一和木卫二分别增亮 0.5% 和 0.02%. 实际上，子彗星 D, E, K, L 等撞击时，几个天文台都未观测到木卫增亮，这与我们的估算符合.

参 考 文 献

[1] Beatty, J. K. and D. H. Levy, *Sky and Telescope*, Vol. **87**, p. 40, 1994.

[2] SL 9, Daily News Bulletin, ESO, 1994.

[3] Chapman, C. R., *Nature*, Vol. **363**, p.492, 1993.

[4] 胡中为，天文学进展，第 **14** 卷，第 1 期，第 19 页，1996.

[5] Mac Low, M. M. and K. Zahnle, *Ap. J.*, Vol. **434**, 1.33, 1994.

[6] Chapman, C. R., *Nature*, Vol. **370**, p.254, 1994.

[7] Beatty, J. K. and D. H. Levey, *Sky and Telescope*, Vol. **96**, p.18, 1994.

[8] Böhnhardt, H. and R. Schulz, *ESO*, Vol.**87**, p.19, 1994.

[9] Bronshten, V. A., Physics of Meteoric Phenomena, D. Reidel Pub. Co., Chap. 1, 1983.

[10] Ceplecha, Z. and J. Browicka, Interrelations Between Physics and Dynamics for Minor Bodies in the Solar System (Ed. by D. Benest and C. Froeschle), Frontieres, p. 309, 1992.

[11] Gehrels, T. (Ed.), Jupiter, The Univ. of Arizona Press, 1976.

[12] Weaver, M. A. et al., *Science*, Vol. **267**, p. 1282, 1995.

[13] Noll, K. S. et al., *Science*, Vol. **267**, p. 1307, 1995.

METEORIC PHYSICAL PROBLEM IN THE COLLISION OF SHOEMAKER－LEVY 9 ON JUPITER

Hu Zhong－wei Chu Yi

(*Astronomy Department, Nanjing University*, 210093)

Wu Yin－gen Huang Ke－liang

(*Physical Department, Nanjing Normal University*)

Abstract

The collision of comet Shoemaker－Levy 9 with Jupiter is essentially a particular meteoric physical problem during the cometary fragments into Jupiter′s atmosphere. In this paper, profile formula of their velocity, mass loss, luminosity, electron line density and energy release rate on height are derived from fundamental equations of meteoric physics. Using reasonable parameters, a series of results are calculated. The results are compared with observations and discussed. It is shown that initial mass of the largest fragment of SL9 is of order 10^{16} g and do not penetrate into H_2O cloud layer of Jupiter due to its airburst.

Key words Comet, Jupiter, Meteoric physics, Impact event