

鹿林彗星的断尾事件研究*

史建春^{1†} 林启生² 胡中为³ 赵海斌¹ 马月华¹

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 国立中央大学鹿林天文台 中坜 32001)

(3 南京大学天文系 南京 210093)

摘要 鹿林彗星在 2009 年 2 月 4 日 (UT) 发生了一次断尾事件, 通过对 2 月 4 日前后的观测数据进行分析, 发现在 2 月 3 日鹿林彗星就已发生过一次断尾事件. 对 2 月 3 日发生的断尾事件进行研究可得出断尾移动的速度为 $68 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 断尾事件发生的时间为 2009 年 2 月 3 日 (15.24 ± 5.16) 时. 结合断尾事件发生前后鹿林彗星的轨道特征和 STEREO-A 飞船所测量到的太阳风数据, 鹿林彗星 2 月 3 日发生的断尾事件可能是由于日冕物质抛射和彗星相互作用导致的磁重联引起的.

关键词 彗星: 个别, 方法: 数据分析

中图分类号: P 134; **文献标识码:** A

1 介绍

彗尾包括等离子体彗尾和尘埃彗尾, 正是通过对彗尾的观测人们才知道了太阳风的存在^[1]. 太阳风和彗星的相互作用使得离子尾呈现出许多大尺度现象, 如结、扭折、螺旋和云等不规则结构, 在这些现象中最壮观的是断尾事件: 等离子体彗尾从彗头附近发生断裂, 大致沿着太阳 - 彗星连线方向远离彗头运动. 断尾事件的发生是很普遍的, 在不同日心距离、日球纬度和太阳活动周期的任何阶段都可能发生^[2]. 虽然目前关于断尾发生的物理机制尚无定论, 但太阳风的变化被认为在彗星断尾现象上起着重要的作用. 现用于解释彗星断尾事件的理论主要有: (1) 压力效应. 太阳风压力的增加使离子彗尾变得不稳定, 进而导致断尾发生^[3]; (2) 磁重联. 彗星通过行星际磁场扇形边界时, 在朝向太阳的一侧发生磁重联^[4], 或者是在尾侧由行星际共转激波或高速流引起的磁重联^[5]. 现有的观测和理论模型^[6] 大部分支持断尾是由于彗星通过扇形边界引起的观点, 但是仍有 25% ~ 50% 的断尾事件并没有发生在扇形边界上, 这意味着还有其它原因也可引起磁重联, 如日冕物质抛射, 其中日冕物质抛射导致彗星 2P/Encke 在 2007 年 4 月 20 日发生的断尾事件已被 NASA 的 STEREO-A 飞船观测到^[7]. 鹿林彗星 C/2007 N3 (Lulin) 是 2007 年 7 月发现的一颗非周期彗星, 它在 2009 年 2 月 24 日离地球最近, 距离为 0.411 AU,

2010-06-02 收到原稿, 2010-06-23 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (11003048、10933004)、中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目和紫金山天文台小行星基金会资助

† jcschi@pmo.ac.cn

星等为 6 mag 左右, 这前后一个多月的观测条件最有利, 包括爱好者都拍摄到它的很多奇特的图像, 如绿色的彗发、显著的反常尘埃彗尾以及变化的等离子体彗尾. 其中 Guido 在 2009 年 2 月 4 日拍摄到鹿林彗星发生了一次断尾事件 (图 1)¹. 下面我们对这次断尾事件前后几日的观测资料进行了分析和研究.

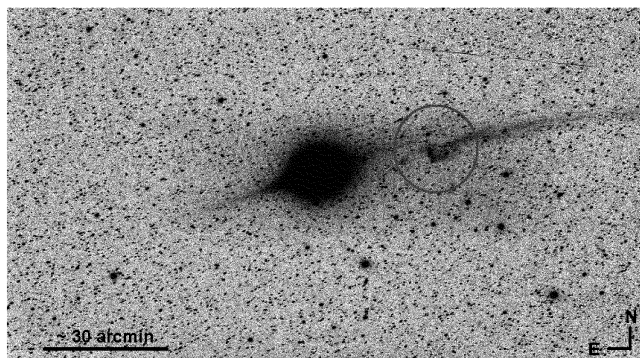


图 1 Guido 在 2009 年 2 月 4.53 日 (UT) 拍摄的鹿林彗星的断尾

Fig. 1 The disconnection event of comet Lulin on 2009 February 4.53 (UT) photographed by Guido

2 观测和数据分析

观测地点是台湾鹿林天文台, 拍摄所用相机为 CANON 450D, 底片为 ASA 1600, 赤道仪为高桥 EM-200, 镜筒口径为 16 cm, 焦比 F3.3. 我们在大量图像中选出 2009 年 2 月 3 日拍摄的 10 幅图像 (表 1) 进行处理. 表 1 中拍摄日期和曝光中间时刻均为世界时. 图像处理除了本底、暗场和平场校正外, 还包括对图像进行三色 (RGB) 分离, 比较分离后的 R 图像 (红光) 和 B 图像 (蓝光) 可看出在 B 图像系列中存在等离子体彗尾, 然后对 B 图像系列进行叠加可发现鹿林彗星的等离子体彗尾在 2009 年 2 月 3 日有着明显的扭折现象, 叠加后的图像为 IMG_10.1 (图 2). 扭折与断尾事件的发生有着紧密联系, 经常会相伴而生^[8], 因此扭折的出现意味着可能会有断尾事件的发生. 此外, 将图 2 和 Guido 在 2009 年 2 月 4 日拍摄到的彗星断尾事件进行比较后可以发现两幅图像等离子体彗尾的形态不同, 一个位于主尾轴北侧 (图 2), 另一个却相反. 分析 2 月 3 日和 4 日鹿林彗星、太阳和地球位置的几何关系可知彗尾形态的差别不可能是由几何投视效应引起的, 这说明鹿林彗星在 2009 年 2 月 3 日就已发生过一次断尾事件, 且该事件与 2 月 4 日的断尾事件不是同一次.

¹<http://www.spaceweather.com/archive.php?PHPSESSID=vh9t3plere7jrfst7nf13asmi0&month=02&day=04&year=2009&view=view>

表 1 鹿林彗星观测表

Table 1 The log of observations of comet Lulin

Image ID	Date	Heliocentric distance (AU)	Geocentric distance (AU)	Phase angle ($^{\circ}$)	Mid-exposure	Exposure (s)
IMG_3709	2009-02-03	1.269	0.853	50.8	20:25:08	181
IMG3710	2009-02-03	1.269	0.853	50.8	20:28:18	181
IMG_3711	2009-02-03	1.269	0.853	50.8	20:31:42	181
IMG_3712	2009-02-03	1.269	0.853	50.8	20:34:52	181
IMG_3713	2009-02-03	1.269	0.853	50.8	20:38:02	181
IMG_3714	2009-02-03	1.269	0.853	50.8	20:41:12	181
IMG_3715	2009-02-03	1.270	0.852	50.8	20:44:23	181
IMG_3716	2009-02-03	1.270	0.852	50.8	20:47:33	181
IMG_3717	2009-02-03	1.270	0.852	50.8	20:50:50	181
IMG_3718	2009-02-03	1.270	0.852	50.8	20:54:00	181

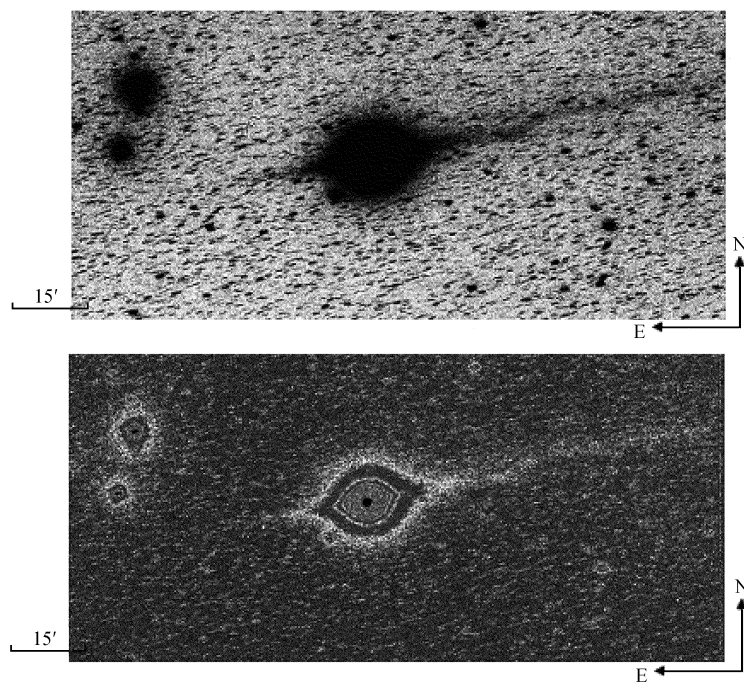


图 2 鹿林彗星的等离子体彗尾. 上图是由 10 幅曝光时间为 181 s 的图像叠加而成, 叠加后图像的曝光中间时刻为 20:39:35 UT. 上图是叠加后的反色图, 下图是上图经增强处理后的等亮度线图, 从两图中均可看出等离子体彗尾的扭折. 图中太阳方向的方位角是 106.4°

Fig. 2 The ion tail of comet Lulin. Top panel: average of 10 exposures with an exposure of 181 s for each. Middle time of exposure is 20:39:35 UT. The image is shown in reverse color. Bottom panel: the isophotes of top panel. Kink of ion tail can be seen in both panels. The position angle of the sun is 106.4°

3 断尾移动速度

为了测定 2 月 3 日鹿林彗星断尾移动的速度, 我们对表 1 中的前 3 幅图像和后 3 幅图像分别进行了叠加. 叠加后的图像分别为 IMG_3_1 和 IMG_3_2, 如图 3. 根据 Jockers 等^[9]的分析认为太阳风通过彗头后离子尾可分为 3 个部分, 如图 4 所示, 图中 AB 段反映了太阳风的原始方向, CD 段反应了太阳风的新方向, 而 AD 段为过渡区域. 通过测定图 3 中两幅图对应的 D 点与彗核中心 C 的距离差, 再除以两幅图的时间差即可得出断尾移动的速度. 离子尾的几何参数见表 2. 表 2 中 D_{CD} 表示彗核中心与断尾处的距离, D_{CA} 表示彗核中心与断尾转折点之间的距离, PA_{AB} 、 PA_{AD} 和 PA_{CD} 分别表示彗尾形态 AB 、 AD 和 CD 段的方位角.

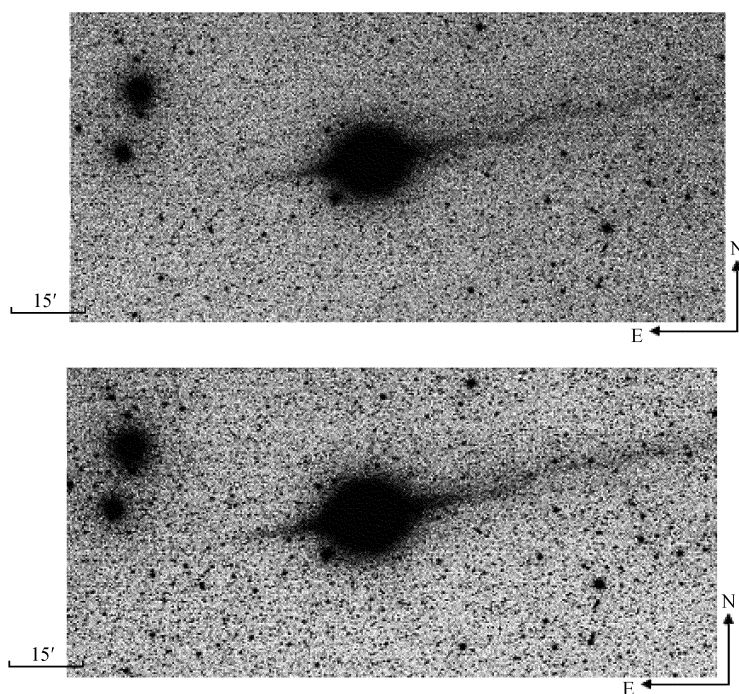


图 3 表 1 中前 3 幅和后 3 幅图像叠加后的图像. 上图是 IMG_3_1, 曝光中间时刻为 20:28:22 UT; 下图是 IMG_3_2, 曝光中间时刻为 20:50:47 UT

Fig.3 Average of the forehand 3 images and last 3 images in Table 1. Top panel is IMG_3_1, middle time of exposure is 20:28:22 UT. Bottom panel is IMG_3_2, middle time of exposure is 20:50:47 UT

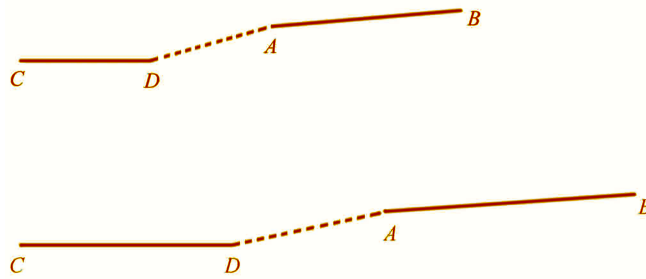


图 4 彗星断尾形态变化示意图. C 为彗核中心, D 为断尾处, A 为断尾转折点, B 为断尾的末端

Fig. 4 The sketch of disconnection event of comet. C is the comet nucleus, D is the disconnection point, A is a turning point of the tail and B indicates the end of the tail

表 2 离子尾特征的几何参数

Table 2 Geometric parameters of ion tail features

Image ID	D_{CD} (10^5 km)	D_{CA} (10^5 km)	PA_{AB} ($^\circ$)	PA_{AD} ($^\circ$)	PA_{CD} ($^\circ$)
IMG_3_1	12.7	15.9	273	305	280
IMG_3_2	13.6	17.0	273	300	280

经计算, 2009 年 2 月 3 日 20:28:22~20:50:47 UT 内鹿林彗星断尾处 D 点相对于彗核中心移动的速度为 $68 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, A 点相对彗核的速度为 $84 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 从 A 点的速度大于 D 点可看出断尾可能存在加速运动, 对应的加速度为 $3.685 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. 如果假定断尾相对于彗核以固定的加速度运动, 就可以对断尾事件发生的初始时刻进行估计. 所用公式如下:

$$\begin{cases} t_D = t_i - \frac{v_i - v_0}{a} \\ v_i = v_{\text{av}(i,i+1)} - a \frac{(t_{i+1} - t_i)}{2} \\ v_0 = (v_i^2 - 2ax_i)^{\frac{1}{2}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 t_D 为断尾事件开始时间, t_i 对应着图 3 中两幅图像的曝光中间时刻 ($i = 1, 2$), v_i 为时刻 t_i 的瞬时速度, $v_{\text{av}(i,i+1)}$ 是在时间 t_i 到 t_{i+1} 内的平均速度, v_0 为断尾发生时刻的初始速度, a 为断尾运动的加速度, x_i 为彗核到断尾处的距离. 经计算, 可得初速度为一虚数, 其原因可能是断尾移动的加速度并不是恒定的. 如果假设断尾的初始速度为 0, 可算出与其相对应的加速度为 $1.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 进而可算出断尾发生的时间为 2009 年 2 月 3 日 (15.24 ± 5.16) 时.

4 断尾事件发生前后太阳风和行星际磁场情况

为了分析鹿林彗星断尾的原因, 需要知道彗星断尾前后太阳风和行星际磁场情况, 而彗星位置上的太阳风和行星际磁场数据可以通过彗星附近的飞船所测量到的数据进行

反推. 这里我们使用 STEREO-A 飞船^[10] 测量到的数据, 太阳 - 地球 - 飞船 - 彗星在 2009 年 2 月 3 日的几何关系如图 5 所示.

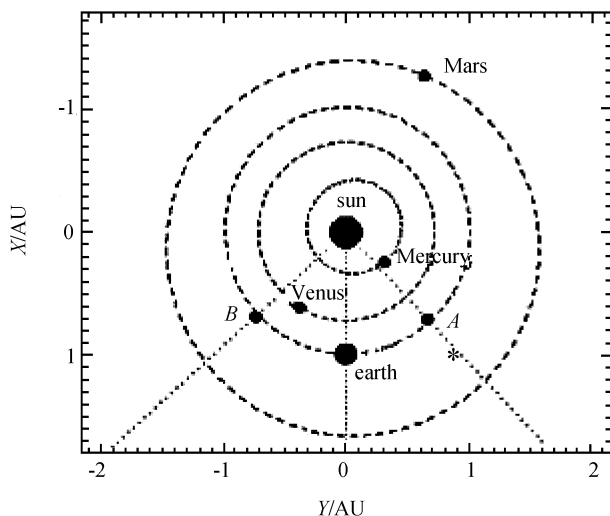


图 5 2009 年 2 月 3 日地球、STEREO-A 和鹿林彗星在日心黄道面上的投影图. 图中 A、B 和 * 分别代表 STEREO-A、STEREO-B 和鹿林彗星的位置

Fig.5 Orbits of the earth, STEREO-A and comet Lulin projected onto the heliocentric ecliptic plane. A, B and star symbol mark the positions of STEREO-A, STEREO-B and the comet, respectively

太阳风从 STEREO-A 到彗星所需的共转时间可由下式得出^[11]:

$$\Delta t = \frac{\theta_s - \theta_c}{\Omega} + \frac{(R_s - R_c)}{V_p}, \quad (2)$$

其中 $\theta_s - \theta_c$ 是 STEREO-A 和鹿林彗星在太阳赤道面上的夹角, R_s 和 R_c 分别是 STEREO-A 和鹿林彗星的日心距, Ω 是太阳赤道的角旋转速度 ($14.4^\circ/\text{d}$), V_p 是太阳风速度. 在 2009 年 2 月 1 日到 2 月 5 日内, $\theta_s - \theta_c$ 从 -1° 变化到 -2.58° , $R_s - R_c$ 从 $-0.291\ 590\ \text{AU}$ 变化到 $-0.309\ 895\ \text{AU}$, 太阳风速度在 $300 \sim 500\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 内变化 (图 6), 可知太阳风从彗星到 STEREO-A 所需的共转时间在 $-1.33\ \text{d}$ 到 $-1.53\ \text{d}$ 内变化, 负号表示太阳风首先到达 STEREO-A. 由于断尾发生的时间为 2009 年 2 月 3 日 (15.24 ± 5.16) 时 (UT), 所以导致鹿林彗星断尾事件的太阳风数据为 STEREO-A 飞船在 2009 年 2 月 2 日 (4.8 ± 7.2) 时 (UT) 所测量到的数据. 从图 6 可看出, 在该时间段内太阳风的速度大致为 $350\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 电子数密度为 $4\ \text{cm}^{-3}$, 行星际磁场为 $4\ \text{nT}$, 动力学压力保持在一个相对稳定的水平, 并没有出现明显的增加, 因此不可能用压力效应来解释鹿林彗星发生的这次断尾事件.

为了分析彗星 - 行星际磁场的相互作用, 我们利用 CCMC (Community Coordinated Modeling Center)² 的 ENLIL MHD 模型^[12] 研究了鹿林彗星附近的太阳风状态, 发现在 2 月 1 日鹿林彗星通过了一个行星际磁场扇形边界, 这一点也可从图 6 中磁场锥角的变

²<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/>

化看出. 但在 2 月 1 日和 2 日的鹿林彗星图像中, 并没有发现有断尾事件发生, 且在 2 月 3 日鹿林彗星已处于径向向外的行星际磁场中 (图 7), 这意味着鹿林彗星在 2 月 3 日的断尾事件也不能用彗星经过行星际磁场扇形边界发生的磁重联来解释.

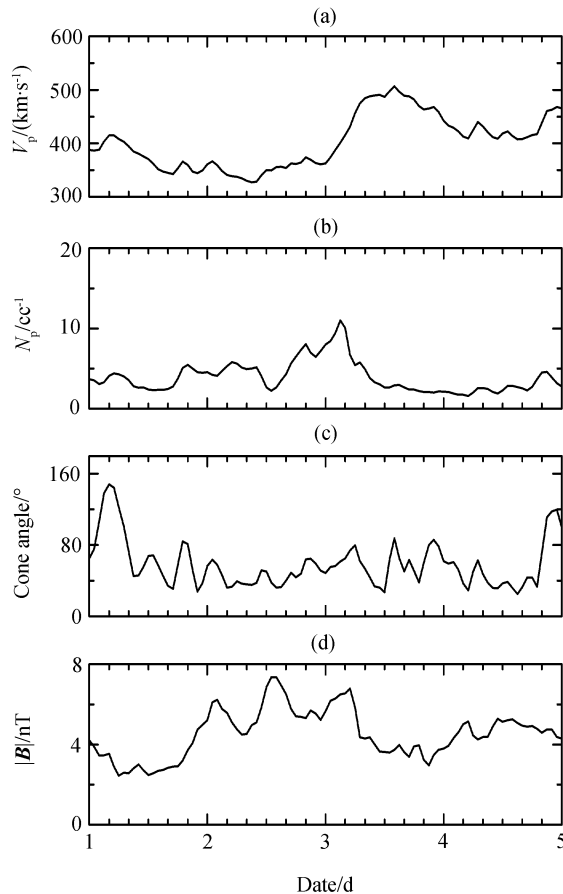


图 6 2009 年 2 月 1 日 ~ 2 月 5 日 STEREO-A 测量到的太阳风和行星际磁场数据. (a) 太阳风速度; (b) 质子数密度; (c) 行星际磁场的锥角 (0° 表示磁场方向背离太阳, 180° 表示磁场方向指向太阳); (d) 磁场强度

Fig.6 Solar wind and interplanetary magnetic field (IMF) conditions observed by STEREO-A from 2009 February 1 to 2009 February 5. (a) Flow speed; (b) proton number density; (c) cone angle of IMF (0° and 180° indicate IMF is in the opposite and same direction of the sun, respectively); (d) strength of IMF

5 日冕物质抛射导致彗星发生断尾事件的可能性分析

根据以上分析, 导致鹿林彗星在 2009 年 2 月 3 日发生断尾事件的唯一可能性为日冕物质抛射与彗星相互作用导致的磁重联. 虽然日冕物质抛射导致这次断尾事件的发生并没有像彗星 2P/Encke 那样得到直接的观测上证实, 但是, 查阅 SOHO 飞船的 LASCO 日冕物质抛射历表可知太阳在 2009 年 1 月 27 日至 2 月 5 日期间共发生 3 次日冕物质抛

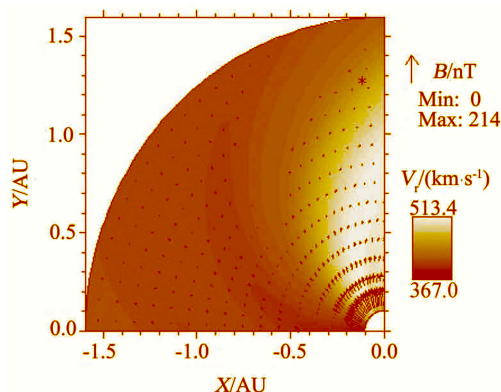


图 7 鹿林彗星在 2009 年 2 月 3 日附近的日球状态. 灰色比例尺表示径向太阳风速度, 箭头表示行星际磁场的径向分量, 箭头的长度正比于磁场强度, 彗星的位置用星号 * 表示

Fig. 7 Status of the heliosphere around comet Lulin on 2009 February 3. The gray scale shows the radial solar wind speed. The arrows represent the radial components of IMF and their lengths are proportional to the magnetic field strength. The location of the comet is shown by the star symbol

射: 1 月 31 日发生两次, 2 月 1 日发生一次³. 日冕物质抛射通常在 1~5 d 内从太阳到达地球, 因此从时间上来看, 鹿林彗星可能受到日冕物质抛射的影响. 此外, 通过鹿林彗星在 2 月 3 日和 4 日发生两次断尾事件可看出, 鹿林彗星在 2 月 3 日发生的断尾事件比较迅速, 这与彗星通过行星际磁场扇形边界导致的断尾事件速度较慢的特点不同.

6 结论

本文通过测量 2009 年 2 月 3 日鹿林彗星断尾相对于彗心运动的速度, 反推出断尾事件发生的初始时间, 并结合当时的太阳风和行星际磁场情况对鹿林彗星发生断尾事件的原因进行了详细分析, 得出的结论是这次断尾是由日冕物质抛射与彗星相互作用导致的磁重联引起的. 至于磁重联是发生在彗星朝向太阳一侧还是尾侧, 从现有资料还不能判定, 这需要更高分辨率的图像来识别出断尾的细节. 对于鹿林彗星在 2 月 4 日发生断尾事件的原因, Guido 认为也类似于彗星 2P/Encke, 是由日冕物质抛射与彗星相互作用导致的⁴.

³<http://spaceweather.gmu.edu/seeds/lasco.php>

⁴<http://www.spaceweather.com/archive.php?PHPSESSID=vh9t3plere7jrfst7nf13asmi0&month=02&day=04&year=2009&view=view>

参 考 文 献

- [1] Biermann L. *ZA*, 1951, 29: 274
- [2] Voelzke M R. *EM&P*, 2005, 97: 399
- [3] Ip W H. *ApJ*, 1980, 238: 388
- [4] Niedner M B Jr, Brandt J C. *ApJ*, 1979, 234: 723
- [5] Russell C T, Saunders M A, Phillips J L, et al. *JGR*, 1986, 91: 1417
- [6] Jia Y D, Combi M R, Hansen K C, et al. *JGRA*, 2007, 112: A05223
- [7] Vourlidas A, Davis C J, Eyles C J, et al. *ApJ*, 2007, 668: L79
- [8] Tomita K, Saito T, Minami S. *A&A*, 1987, 187: 215
- [9] Jockers K, Lust Rh. *A&A*, 1973, 26: 113
- [10] Kaiser M L, Kucera T A, Davila J M, et al. *SSRv*, 2008, 136: 5
- [11] Brosius J W, Holman G D, Niedner M B, et al. *A&A*, 1987, 187: 267
- [12] Odstrcil D, Linker J A, Lionello R, et al. *JGRA*, 2002, 107: 1493

The Disconnection Event of Comet Lulin

SHI Jian-chun¹ LIN Chi-sheng² HU Zhong-wei³ ZHAO Hai-bin¹ MA Yue-hua¹

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Lulin Observatory, National Central University, Zhongli 32001*)

(3 *Astronomy Department, Nanjing University, Nanjing 210093*)

ABSTRACT The disconnection event (DE) is the entire plasma tail or its part separates from the cometary head. It is one of the most spectacular phenomena of comets. The driving mechanism remained unresolved and there are many competitive theories to explain the onset of DE at present. However, the variable solar wind is suspected to play a major role. Comet Lulin showed a DE on 2009 February 4. The data around this day are analyzed and it is found that comet Lulin had already occurred a DE on 2009 February 3. By comparing the morphology of plasma tail of these two DEs, it is concluded that the DE occurred on 2009 February 3 is a new DE, different from that occurred on 2009 February 4. In this paper, we report the result of the analysis of DE on 2009 February 3. The calculated occurrence time of DE is, in UT decimal date, 2009 February 3.635 ± 0.215 . The radial velocity of the disconnection tail is about $68 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Considering the orbit characters of comet Lulin and the solar wind conditions around comet Lulin, it is concluded that the DE occurred on 2009 February 3 was driven by magnetic reconnection between comet and a coronal mass ejection. The solar wind conditions around comet Lulin are inferred to the comet by corotation of STEREO-A data.

Key words comets: individual, methods: data analysis