第15卷 第4期 空间科学学报 Vol. 15, No. 4
1995年10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1995

两冕流间的对称径向膨胀日冕物质抛射事件*

章 公 亮
(中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080)

摘 要

本文讨论了发生在冕流对之间的1980年5月6日日冕物质抛射事件. 提出了一种描述事件外环运动的经验模型,把环的观测外形表达为在运动坐标系中的 Cassini 函数. 环的发展过程分为两个阶段: 在前一阶段,外环处于冕流对盔状结构之间,事件的发展以角宽度膨胀为主,其对称轴从赤道向北纬方向移动; 径向膨胀和上升速度较低,加速效应明显. 在后一阶段,外环越过冕流盔状结构所在高度,角膨胀趋于停止; 运动接近于等角宽度和纯径向匀速的膨胀和上升运动. 当外环向外运动时,其顶部和几何中心的高度均随时间而增加,但其底部高度基本上保持不变. 根据上述观测特征,讨论了事件形成的可能机制.

关键词 日冕物质抛射,爆发日珥,冕流

一、引 言

日冕物质抛射 (CME) 是当代日地物理学的重要发现之一,已成为日地物理学界的重要前沿研究领域,并积累了大量宝贵的观测资料[1-4]. 目前尽管对 CME 事件的观测数据已作过许多分析研究[5-9],但由于数据量大,只能着重于事件的基本形态特征、分类及发生规律的统计研究. 所用的分析方法都比较简单,局限于讨论事件环状结构的最高顶点的运动特征,或者是结构外形轮廓的描述,对事件的发展过程缺乏深入的讨论.

CME 的加速问题对其成因机制的研究是很重要的. 目前对 CME 的研究着重在其运动速度,讨论加速的并不多[10]. 这有两方面的原因: 其一是加速通常发生在低日冕区,要借助地面色球 Hα 对日珥和日冕仪的观测,资料完整的事件并不多. 另外,环的顶部经常越出卫星仪器的视野范围,从而丢失相当多的信息. 在许多情况下,只能用时间的线性函数拟合以求出平均运动速度,难以精确求出加速度.

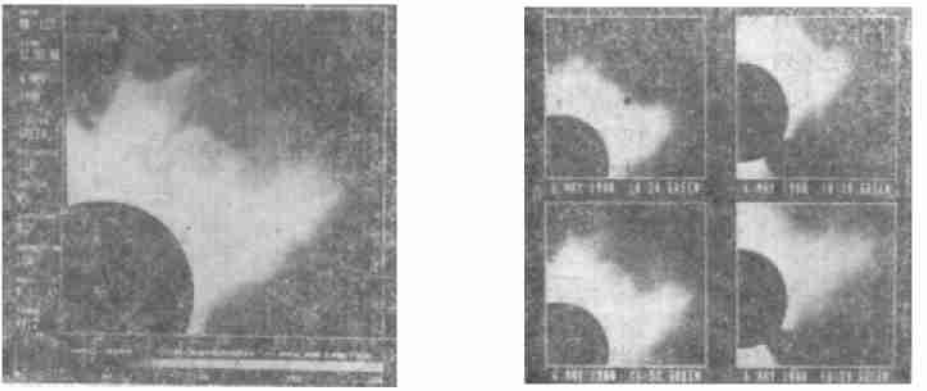
1980年5月6日(80127) CME 事件是发生在太阳两冕流之间,形态非常对称的典型事件,在视野范围内仍有加速. 它的发展过程反映了冕流对结构与事件的相互作用,从而为其起因提供了重要启示. 到目前为止,只有文献[11]讨论了与此事件相关的爆发日

* 国家自然科学基金资助项目.
本文于1994年9月3日收到.

珥特征，对于太阳峰年卫星（SMM）日冕偏振仪（C/P）观测到的丰富图象信息尚未有人加以分析。本文提出的用 Cassini 函数拟合的分析方法，可弥补图象观测不完整的缺陷，从而能深入讨论 80127 事件的加速和发展过程。

二、事件的基本特征

除 CME 事件的外环-暗腔-内环的典型结构外，80127 事件的重要特征是它发生在两冕流之间，结构和外形非常对称。这是与发生在冕流中的 80231 非对称事件[12]是完全不同的。图 1(a) 是 1153UT 的观测图象，它是本事件最有代表性的。图象取在太阳西边缘赤道象限。左下角的黑圆为太阳挡板，点圆划出太阳色球，箭头沿太阳自转轴指向北极。可以看到西边缘赤道两侧各有一盔状冕流，事件恰好夹在此冕流对之间，外环的左、右两足各与同侧冕流的最亮部分(即其内核)相联。位于暗腔内的内环外形很像气球，它是具有很强 Hα 发射的爆发日珥，可以看到其中有多重磁绳状精细结构。



(a) 1153UT 的图象 (Image for 1153UT) (b) 1024,1038,1153 和 1329UT 的图象 (Images for 1024, 1038, 1153 and 1329UT)

图 1 SMM C/P 观测到的 1980 年 5 月 6 日日冕物质抛射事件

Fig. 1 The 6 May 1980 CME event observed by SMM C/P

SMM C/P 对 80127 事件的观测共得到 23 幅图象，观测时间包括两个时段：1024—1045UT 和 1134—1221UT，在 1046—1133UT 之间无观测图象。图 1(b) 列出几个不同时间的该事件的图象，其中 1024UT 是最早观测到的图象。外环已经出现，而暗腔则更靠近右侧冕流。至 1038UT，除外环上升外，暗腔开始移动至两冕流之间，此时紧靠太阳挡板边缘处已能看到一条亮线，这是爆发日珥的顶部。从下面的讨论，将能看到事件的发展可分为两个阶段：在第一阶段，外环夹在两冕流盔状结构之间，事件的发展受到冕流对结构的影响；在第二阶段，外环的上半部已上升到超出冕流对盔状结构的高度。这两个阶段事件的运动特征是不同的。1024 和 1038UT 属于第一阶段，而 1153UT 则是第二阶段。到 1329UT，事件已超出 C/P 的视野范围，显示了事件后的状态。此时，冕流对依然存在，但受到事件的影响，各向所在半球更高纬度处偏转。

三、Cassini 函数拟合

目前有关 CME 的研究，对观测资料的分析方法都比较简单，通常是凭直觉测量环顶部的位置，从而得出其径向运动速度．这种常用的分析方法忽视了事件的横向膨胀，而当观测图象不完整时就无法确定顶部的位置．因此有必要发展新的分析方法．下面介绍本文提出的，对事件的运动特征用二维函数进行拟合的方法．考虑到事件的发展是某种确定的物理因素所驱动的，不同时间的事件图象之间应该有相似之处．把外环的运动分解为整体运动和在运动坐标系内的膨胀两部分，后者用某种特定的几何函数来描述．经过试验，对于像 80127 这样的对称事件，用 Cassini 函数拟合精度比用 Pascal 函数为好．

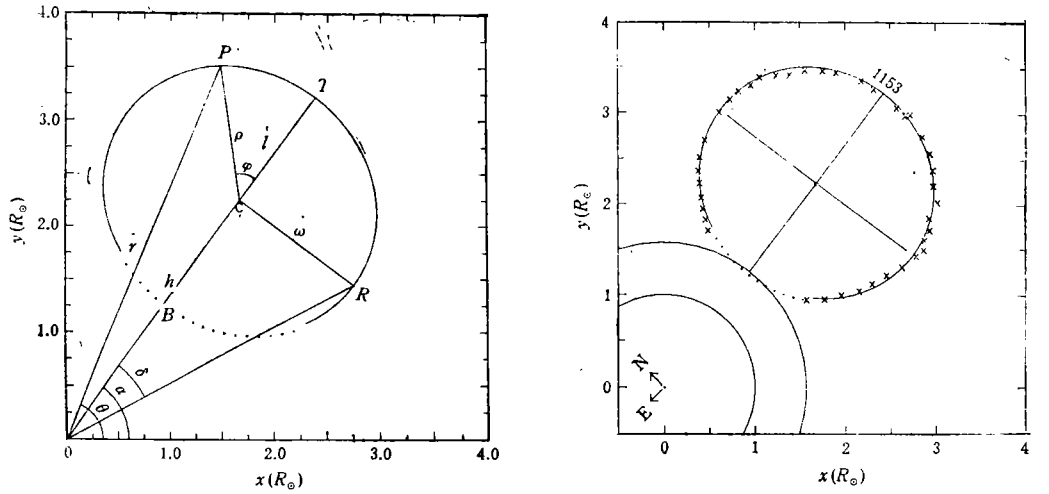
Cassini 函数的图形有点像椭圆，不同之处是曲线上任一点到两焦点距离的乘积为常数．椭圆对 x，y 两坐标轴都是对称的，但 Cassini 函数可以对某一轴不对称．在直角坐标中，焦点在 y 轴上的 Cassini 函数可表达为

$$(x^2+y^2)^2-2c^2(y^2-x^2)=a^4-c^4. \tag{1}$$

或用极坐标表达为

$$\rho^4+2c^2\cos 2\varphi-(a^4-c^4)=0. \tag{2}$$

其中焦点的坐标分别是 $(0,\pm c)$ 或 $(c,\pm\pi/2)$，曲线上任一点离两焦点的距离乘积为 a^2.



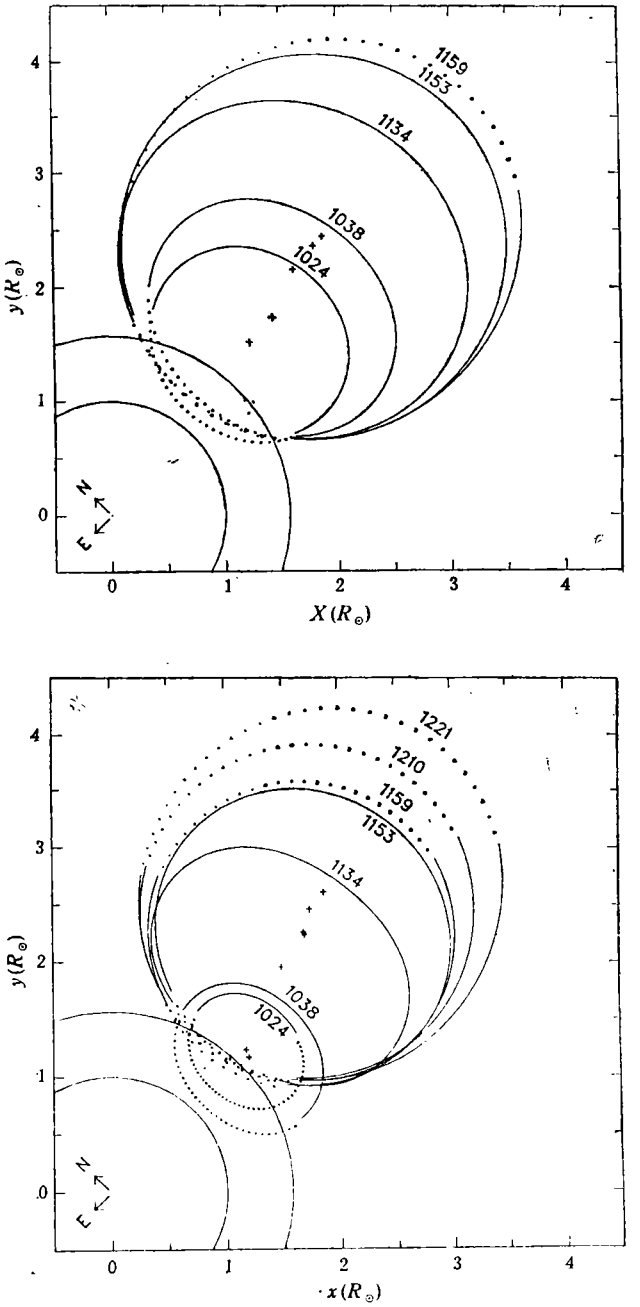
× 观测值 (Observed value)　——拟合曲线 (Fitted curve)
……外延曲线 (Extrapolated curve)

(a) 拟合示意图 (Schmetic diagram for curve fitting)
(b) 拟合示例 (An example for curve fitting)

图 2　环轮廓的 Cassini 函数拟合
Fig. 2　Cassini function fitting of loop profile

图 2(a) 画出 Cassini 函数拟合示意图，图中 O 为太阳中心，(x,y) 为观测坐标系．运动坐标系由对称轴 OCT 的方位角 α 和几何中心 C 的高度（日心距离）h 来确定．取

运动坐标系的原点在 C，OCT 为 X 轴．环轮廓上任一点 P 的观测坐标为 (r,θ)，在运动系内则为 (ρ,φ)．



+拟合曲线的几何中心 (Geometrical center of fitted curve)
——拟合曲线 (Fitted curve) ……外延曲线 (Extrapolated curve)
(a) 外边缘，前沿 (Outer edge, Front) (b) 内边缘，暗腔 (Inner edge, Cavity)

图 3 1980 年 5 月 6 日日冕物质抛射事件的外环轮廓的变化

Fig. 3 Change in the profile of outer loop in the 6 May 1980 CME event

图象的测量和拟合方法和步骤如下：

(1) 对每时刻的观测图象确定若干轮廓点的坐标(r,θ).

(2) 用插值法求出同高度 r 两侧轮廓点的方位角 θ_1, θ_2. 其平均值即为该高度对称轴的方位角. 再对不同高度求平均即得该时间的对称轴方位角 α.

(3) 用误差试探法，沿对称轴移动几何中心 C 的位置，对环轮廓位置测量值用 Cassini 函数拟合，求出最佳拟合，以确定几何中心 C 的日心距离 h、及环参数 c^2 和 a^2.

(4) 利用求得的参数 c^2 和 a^2，求出环顶部的日心距离 OT 和径向尺度 l，横向尺度 ω 和角宽度 δ.

为了说明上述拟合的精度，图 2(b) 画出 1153UT 外环内边缘的轮廓. 可以看到拟合是非常好的. 图 3 给出外环外边缘(前沿)和内边缘(暗腔)在不同时间的拟合曲线. 当观测图象完整时，用此法可以提供环参数的精确值，而当图象不完整时，可以提供外延估算值，从而尽可能多地得到事件发展和演化的信息.

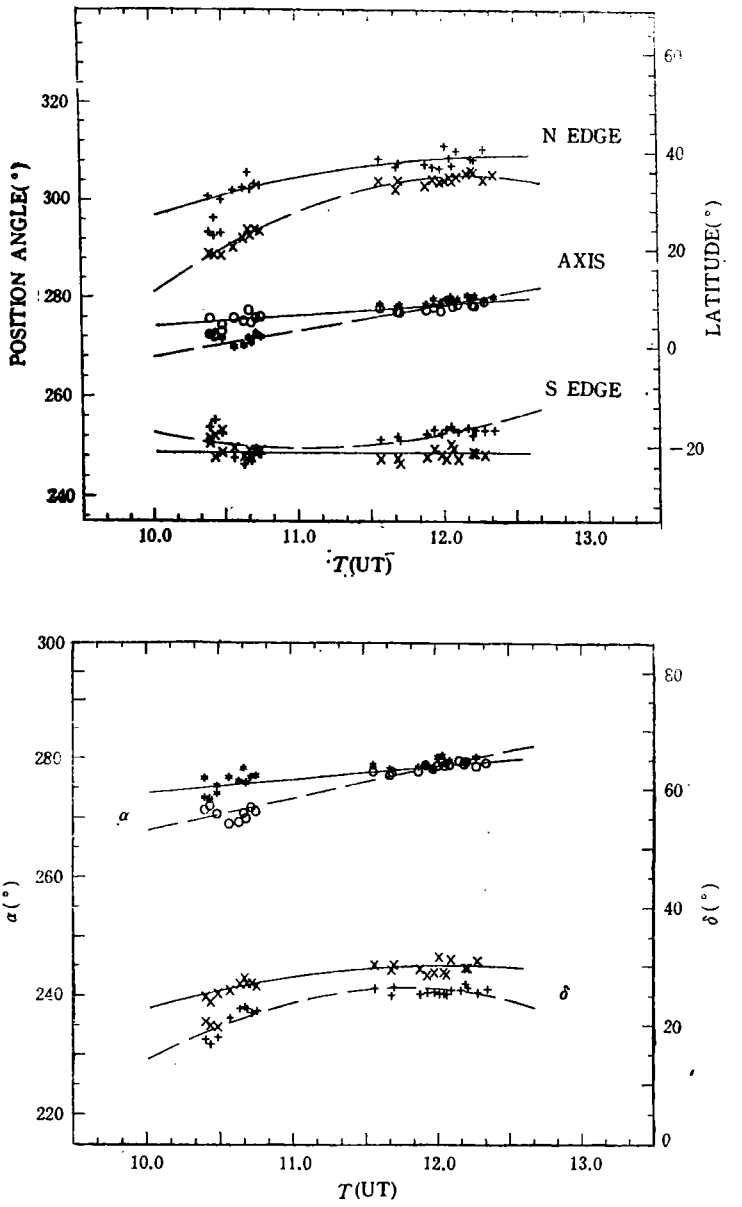
四、横向运动

利用上述 Cassini 函数拟合所得到的事件特征参数的时间变化，可以定量讨论事件的发展过程. 图 4 和图 5 分别画出横向和径向运动特征参数的时间变化，不同的参数用不同的符号表示. 对这些参数的时间变化用时间的多项式进行拟合，所得的结果分别用实线和虚线表示外环前沿和暗腔的变化. 由于量度图象误差等原因，数据有一定的分散度，多项式拟合一般只用直线或二次曲线.

第二节已指出 80127 事件的重要特征是在一对冕流之间的对称运动. 通过下面的讨论，可以了解并非一开始就达到这种对称运动的. 研究事件如何从非对称发展为对称运动，将能提供它的起因的某些启示. 图 1(b) 中的 C/P 图象及图 3 中的轮廓拟合曲线和其几何中心的位置，都显示出这种由非对称到对称的发展过程. 在事件发展的第一阶段(1024 和 1038UT)，暗腔的位置更靠近右侧(南侧)冕流，随后才运动至与冕流对接近对称的位置. 而外环前沿则从开始被观测到时起，位置就比较接近与冕流对相对称. 图 4(a)则定量说明了，在第一阶段，暗腔的对称轴位于位置角 270° 附近(即靠近太阳西边缘赤道). 而外环前沿的对称轴则比暗腔偏北约 5° 左右. 这就是说，在第一阶段外环前沿与暗腔的运动并不完全协调. 随着时间的推移，暗腔和外环前沿的对称轴都向北移动. 到第二阶段，两者的对称轴几相重合，位于位置角 280° (即 10°N) 左右，从而协调为同轴运动.

值得注意的是在第一阶段，横向运动不仅是对称轴的位移，还存在着横向膨胀，尤其是暗腔的膨胀. 图 4(b) 下部的角宽度点和曲线说明了这种发展过程. 在开始阶段，暗腔的角宽度是 16—17°. 接着它迅速增大至 23° 左右. 外环前沿的角宽度也有增大，但膨胀速率较小. 到第二阶段，这种横向膨胀接近于停止，暗腔和外环前沿的角宽度分别保持在 26° 和 30° 左右，形成等角宽度的运动.

还要指出的是，事件的发展，尤其是横向膨胀，对冕流的位形有明显的影响. 对比图 1 中不同时间的 C/P 图象，可以看到北侧冕流受事件的影响比较大，盔形结构外形发生



—— 外环前沿 (Outer front) …… 外环暗腔 (Outer cavity)

(a) 北南两边缘和对称轴位置 (Northern and southern edges and symmetrical axis)

(b) 对称轴位置 α 和角宽度 δ (Symmetrical axis α and angular width δ)

图 4 1980 年 5 月 6 日日冕物质抛射事件的横向运动参数的时间变化

Fig. 4 Time changes of the lateral kinematic parameters in the 6 May 1980 CME event

弯曲，位置北移. 这分明是横向膨胀的影响. 但奇怪的是横向膨胀对南侧冕流的影响并不明显. 图 4(a) 中外环前沿和暗腔北南两边缘的时间变化也说明了这种情况，外环前沿尤其是暗腔的北边缘显著地向北纬移动. 在第一阶段的观测时间内，暗腔的北边缘从北纬 18°N 向北移动至 25°N，到第二阶段则保持在 34°N 左右的位置. 而外环前沿的北

边缘则在第一阶段从 30°N 北移至 34°N，然后保持在 38°N 左右．但是事件南边缘的变化并不明显，暗腔和外环前沿分别停留在 16°S 和 20°S 的位置，起伏在误差范围以内．由于外环的足部与两冕流的最明亮部分相联，横向膨胀对南北边缘的不同影响也反映了事件对冕流位形的不同影响．

80127 事件的横向膨胀的主要特征归纳如下：

(1) 在事件发展的第一阶段，暗腔的横向运动是不对称的，即主要向北纬方向移动和膨胀，从而引起了外环对称轴和北边缘的北移，及冕流的相应变化．

(2) 在事件发展的第二阶段，暗腔和外环前沿的角膨胀和北移趋于停止，两者各保持接近不变的角宽度并沿同一对称轴作对称运动．

五、径向运动

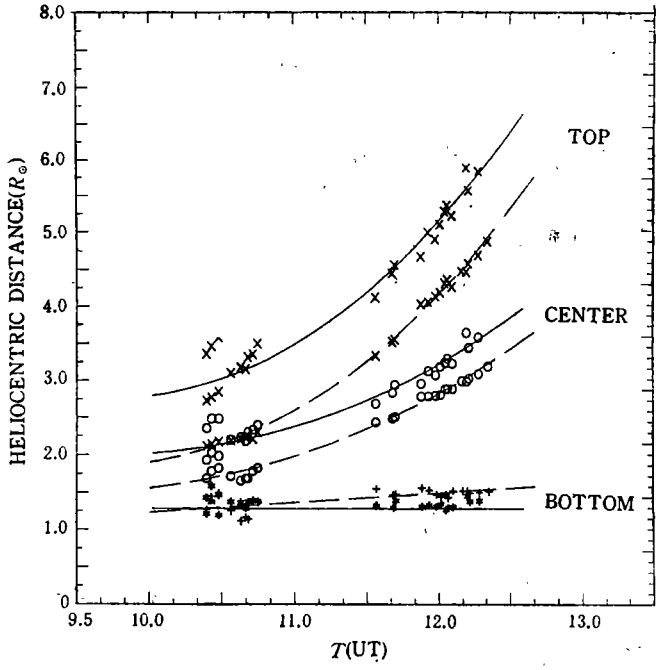
在事件发展的最初阶段，有三幅 C/P 图象中的外环比较明亮，可以区分出它们有双重结构，对应的运动参数也有两组．图 5(a) 中外环前沿顶部有三个点远高出时间拟合曲线，它们是最外层结构的顶部，具有很快的运动速度．但在以后的图象中未能找到与它们相对应的结构．它们可能是 CME 事件的先行 (forerunner) 波动．在时间多项式拟合时只采用了第二层次相应的点．在图 4、5 中相应的三个特殊点也都是这样处理的．

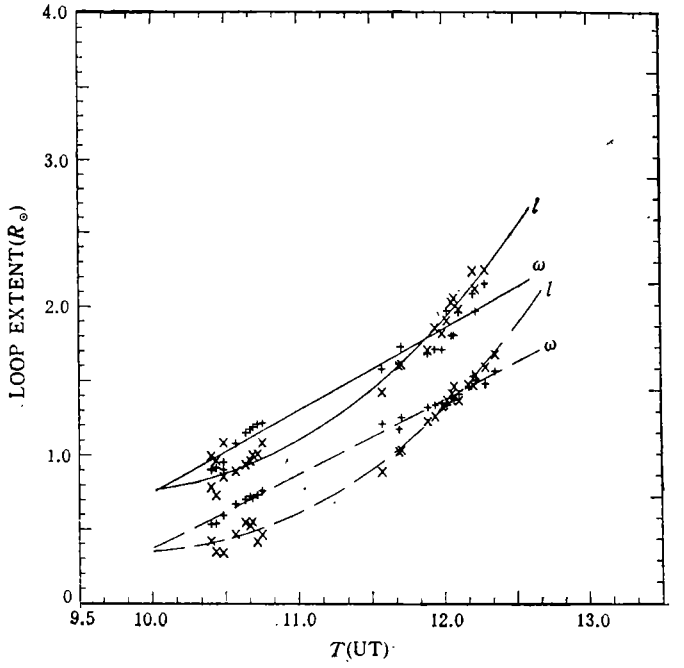
在图 5(a) 中，外环前沿顶部和几何中心的径向运动都是用时间的二次曲线来拟合的．对于暗腔来说，这种拟合是相当好的．但外环前沿的情形就有所不同，在第一阶段的第二层次顶部运动也是相当快的，像是先行扰动的又一波峰．从 C/P 图象中，无法再区分出与后期前沿相对应的第三层次结构．因此，只能根据这些资料作全过程时间的二次曲线拟合，其结果与暗腔的曲线非常相似，说明是可取的．以下只讨论这种全过程拟合曲线的运动特征．

1030UT 时，外环前沿顶部位于离太阳中心 $3.03R_\odot$ 处，径向速度为 128km/s；在 1200UT 到达 $5.18R_\odot$ 处，速度增加至 422km/s．在同一时间段内，暗腔顶部从 $2.15R_\odot$ 上升至 $4.20R_\odot$，径向速度由 131km/s 增加至 391km/s．因此在事件后期，暗腔顶部径向速度稍低于外环前沿，外环的厚度随时间略有增大，不存在暗腔对前沿的追赶及形成激波的征兆．但在误差范围内，后期外环的径向加速并不大，运动接近于等厚度、匀速的上升运动．

外环的径向运动实际上包括几何中心的运动和径向尺度的变化．前者是外环作为一个整体的运动，后者则是在此运动坐标系内的膨胀．从图 5(a) 可以看到，在拟合曲线上，外环前沿中心在 1030UT 时位于 $2.15R_\odot$ 处，径向速度为 66km/s；而暗腔中心则在 $1.75R_\odot$ 处，径向速度为 72km/s．到 1200UT，前沿中心升至 $3.25R_\odot$，速度为 217km/s；暗腔中心在 $2.85R_\odot$ 处达到 209km/s 的速度．在误差范围内，同一时间两中心的速度可以认为是相同的．

以上讨论说明，前沿和暗腔的中心径向运动速度只略高于顶部运动速度之半．这说明存在径向膨胀．图 5(b) 画出径向和横向尺度的时间变化．可以看到径向尺度的变化也近似于等加速过程．在 1030UT，前沿和暗腔的径向膨胀率分别为 60 和 39km/s；而





—— 外环前沿 (Outer front) ····· 外环暗腔 (Outer cavity)

(a) 顶部、几何中心和底部 (Top, geometrical center and bottom)

(b) 径向长度 l 和横向宽度 ω (Radial length l and lateral width ω)

图 5 1980 年 5 月 6 日日冕物质抛射事件的径向运动参数的时间变化

Fig. 5 Time changes of the radial kinematic parameters in the 6 May 1980 CME event

到 1200UT 分别增至 211 和 186km/s. 径向膨胀速率大体上接近同时间几何中心的径向速度，这暗示着径向尺度与几何中心之间可能存在某种关系. 另外值得注意的是，尽管外环前沿和暗腔均不断上升，但其底部(除最初阶段外)几乎是保持不变的(图 3 和 5). 当然，底部实际上并未观测到，其形状也决不像外延曲线那样简单. 但是这种外延特征隐含着或许是重要的物理意义，即径向尺度与几何中心之间可能存在某种关系. 要说明的是在事件的前一天(80126)，在同一太阳区域观测到另一 CME 事件，也具有类似的特性. 我们将另行讨论此问题.

从图 5(b) 还可以看到，无论是外环前沿还是暗腔，横向尺度接近于随时间线性增加. 但是要注意的是在第一阶段，横向尺度的增加是事件角宽度的增加，即横向膨胀引起的；而在第二阶段，外环的角宽度无明显增加，横向尺度的增加只是几何拓宽，事件前沿和暗腔作纯径向的上升和膨胀运动. 在第一阶段，横向尺度及其膨胀速度均大于径向尺度和膨胀速度，前沿和暗腔均呈扁平外形. 到第二阶段，径向膨胀速度超过横向膨胀速度，径向尺度也逐渐超过横向尺度，前沿和暗腔的轮廓由扁平变为狭长(图 3).

径向运动特征可归纳如下：

(1) 在第一阶段，外环前沿有多重传播速度较快的先行扰动，外环物质和暗腔接近于等加速上升和膨胀运动.

(2) 在第二阶段，外环前沿和暗腔均接近以匀速作纯径向和上升膨胀运动，无明显的暗腔对前沿的追赶作用.

六、物理推论

本文讨论的 80127 CME 的观测特征，可以引出关于它的形成机制的如下推论：

(1) 事件发生在冕流对之间，外环与两侧冕流最明亮的核心部分相联，轮廓外形相对于冕流对非常对称. 这说明两冕流内核均对外环等离子体有所贡献. 因此要有一种物理机制使两冕流内核的等离子体相联通.

(2) 在事件开始被观测到时，它的发展是不对称. 暗腔从右侧冕流出发向左膨胀，说明驱动结构起源于右侧冕流底部.

(3) 冕流对磁场和流场结构对事件的发展有重要影响. 当外环处于冕流对盔状结构之间时，事件的发展以角宽度膨胀为主，除先行扰动外，其径向膨胀和上升速度均较低，加速效应明显. 而当它越过冕流内核高度进入接近径向的磁场位形时，运动达到某种动力学平衡，角膨胀趋于停止. 两者接近于匀速的同轴、等角宽度、和纯径向的对称膨胀和上升运动.

(4) 在 SMM C/P 的视野观测范围内，无明显的暗腔对前沿追赶效应. 这说明驱动结构的内部磁压力并不特别强.

关于 80127 事件形成的机制和数值模拟的结果，将在以后的文章中介绍.

致谢　感谢高山天文台提供 SMM 卫星的 C/P 图象，及 R. M. MacQueen, A. J. Hundh ausen, B. C. Low, J. T. Burkepile 和 A. Stanger 等的有益讨论和帮助.

参 考 文 献

[1] MacQueen, R. M., *Phil. Trans. Royal Soc.*, Vol. **297**, p. 605, 1980.
[2] Sheeley, N. R., Jr., A. Howard, D. J. Michels and J. Koomen, Solar and Interplanetary Dynamics (Ed. by M. Dryer and E. Tandberg-Hassen), D. Reidel, p. 55, 1980.
[3] MacQueen, R. M. et al., *Solar Phys.*, Vol. **65**, p. 91, 1980.
[4] Burkepile, J. T. and O. C. St. Cyr, NCAR/TN — 369 + STR, 1993.
[5] MacQueen, R. M. and R. R. Fisher, *Solar Phys.*, Vol. **89**, p. 89, 1983.
[6] MacQueen, R. M. and D. M. Cole, *Ap. J.*, Vol. **299**, p. 529, 1985.
[7] Howard, R. A., N. R. Sheeley, Jr., M. J. Koomen and D. J. Michels, *J. Geophys. Res.*, Vol. **90**, p. 8173, 1985.
[8] Hundhausen, A. J. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. **89**, p. 2639, 1984.
[9] Hundhausen, A. J., *J. Geophys. Res.*, Vol. **98**, p. 13177, 1993.
[10] Hundhausen, A. J., J. T. Burkepile and O. C. St. Cyr, *J. Geophys. Res.*, Vol. **99**, p. 6543, 1994.
[11] Mein, N. et al., *Ap. J.*, Vol. **114**, p. 192, 1982.
[12] 章公亮,空间科学学报,第15卷,第169页,1995.

RADIAL EXPANSION OF A SYMMETRICAL CME BETWEEN TWO CORONAL STREAMERS

Zhang Gong-liang
(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract

The CME event on May 6, 1980, occurring between a pair of coronal streamers, is discussed in this paper. An empirical kinematical model is proposed for describing the motion of outer loop of the event, in which the observed profile of loop is fitted in terms of the Cassini function in a moving coordinate system. The development of the loop can be distinguished into two different phases. During the first phase, when the loop lay between the helmet structures of streamer pair, the development of event is dominated by expansion of angular width with the asymmetrical axis shifting to northern latitudes; the speed of radial expansion and outward motion were rather low with remarkable acceleration. During the second phase, when the outer loop moved beyond the height of helmet structure of coronal streamer, the angular expansion ceased; the motion approached to an expansion and lift mainly in the radial direction with uniform speed and invariable angular width. As the loop moved outward, both the top and center heights increased with time, however, the bottom remained nearly fixed. Based on the above observational characteristics, a possible mechanism is put forward for the formation of the event.

Key words Coronal mass ejection, Eruptive prominence, Coronal streamer