具有前鞘结构的日冕瞬变活塞模型

唐泽眉　胡文瑞
（中国科学院力学研究所，北京）

摘　要

根据观测数据的分析，大尺度环状或球形日冕瞬变现象具有一前鞘区域．这个区域与它之后的快速瞬变运动之间应有一定的关系，属于同一动力学过程．在本文中，用在太阳引力场中以某一速度规律运动的球形活塞气体动力学模型，来研究带有前鞘区的日冕瞬变事件．理论结果与观测的比较表明，这种活塞模型可以较合理地解释前鞘区及在它之后的快速瞬变的几何特性、运动学和动力学特性．

一、引　言

具有很大能量的日冕瞬变事件实质上是大质量的等离子体抛射出日面．它成为太阳物理学中的前沿课题之一．近来已经对这些事件进行了详细的观测[1-4]．空间日冕仪探测了日冕中2—6太阳半径范围内事件的特征；地面日冕仪提供了瞬变事件在低日冕区的信息．与此同时也进行了许多观测分析和理论研究工作．

天空实验室日冕仪在 227 个观测日中，记录了 77 次瞬变事件[1]．从这些日冕图的分析可知，每一个大型环形或球形日冕瞬变都有一个外缘——一个前鞘区域．这个区域中日冕的密度从背景日冕密度逐渐地增加到瞬变量前沿值．前鞘区的运动无论在时间上和空间上都领先于明亮高密度区．1973 年 12 月 19 日的日冕图给出了一次日冕瞬变事件的完整图象[4]（图 1）．一个明亮的稠密环之后为一低密度暗区，在它之前明显地存在着稍亮的前鞘外缘．还没有观测到只有前鞘外缘而无相继的明亮瞬变运动事件．瞬变事件的空间位形、图象速度和密度分布都意味着前鞘区似乎是太阳质量喷射事件的早期日冕位形，在前鞘区和它之后的快速稠密质量向外运动之间多半有着某种联系[5]．观测的统计分析表明，70% 以上的日冕瞬变事件都与太阳表面的质量喷射事件，例如爆发日珥和太阳耀斑有关[1]．

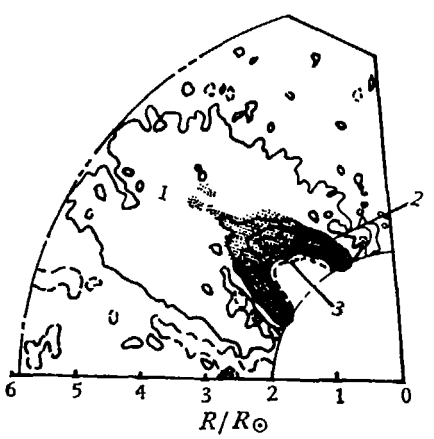


图 1　1973 年 12 月 19 日瞬变事件图
（1——前鞘区，2——高密度区，3——稀疏区）

本文 1985 年 6 月 8 日收到，1985 年 11 月 15 日收到修改稿．

二、活塞模型

大多数日冕瞬变事件与太阳耀斑和爆发日珥相联系，而太阳耀斑和爆发日珥都是日冕中具有剧烈运动的能量释放过程．日冕瞬变事件实质上是大质量的等离子体受驱动后向外高速地运动．太阳耀斑和爆发日珥的驱动力往往是局域中的 Lorentz 力．不少模型认为，日冕瞬变的驱动力也是电磁力．

当太阳耀斑、爆发日珥或者其它太阳活动抛射的等离子体在日冕中运动时，它将挤压或稀疏邻近的，前、后区域中的等离子体，形成高密度压缩区和低密度稀疏区．当太阳活动抛射的等离子体在磁场区域中运动时，它可能挤压闭磁场而形成强的磁弧，与磁弧一起驱动前面的等离子体；或者从开磁场中挤出一个流动通道并喷射出去．如果我们把这些驱动日冕等离子体的活动看成是活塞运动，稠密等离子体的动力和（或）活塞中的 Lorentz 力就是瞬变事件的驱动力．

日冕瞬变的活塞模型认为，太阳表面喷发的等离子体向外喷射到具有闭磁场位形的磁力线管区域中，构成了稠密的等离子体活塞．在它之前为明亮稠密的压缩区，其后为低密度暗区．考虑活塞运动的气体动力学效果，这个理论模型曾被用来满意地解释了日冕瞬变的主要观测现象[6-9]．

太阳活动释放能量的过程是复杂而多变的．在一次大的爆发之前，常常先有一些较小规模的能量释放过程．将这个概念用于日冕瞬变的活塞模型，就应有多级活塞驱动，每一级活塞既包括驱动等离子体，也可以包含有相应的磁结构．按照强引力场中运动的球形活塞模型，我们讨论具有前鞘区、明亮高密度区及暗低密度区的一次完整的太阳表面爆发事件．我们认为，在主要的稠密等离子体爆发之前，仅有少量等离子体逐渐喷射到日冕空间的闭磁场位形中形

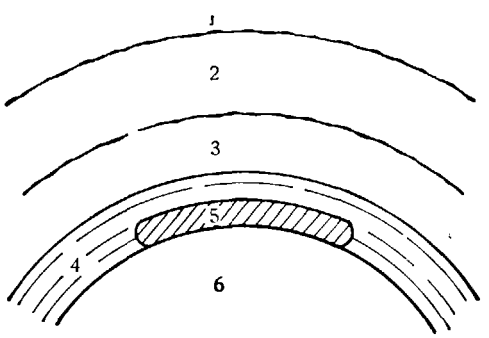


图 2　球状瞬变事件物理图象
（1——静止日冕，2——前鞘区，3——压缩流区，4——磁场区，5——爆发日珥，6——稀疏区）

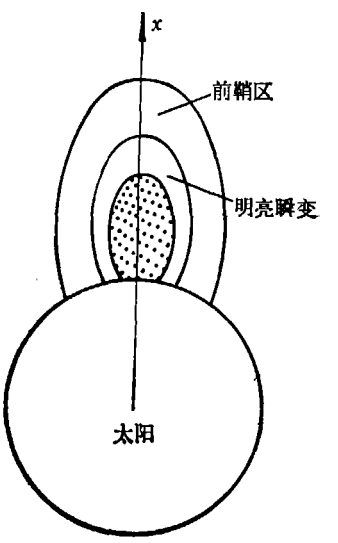


图 3　本文中采用的球坐标系

成活塞. 在初期,由于喷射物质量少,或具有较小的速度,活塞慢速向外运动,因而在它之前形成一个密度较瞬变事件前日冕中密度稍有增加的区域,我们称它为前鞘区. 一段时间之后,主要爆发开始,活塞运动突然加速,在活塞之前,前鞘区之后出现了明亮的高密度区,活塞之后是一低密度暗区域. 所有这些部分构成一次完整的事件(图 2),可以用活塞模型同时解释.

三、活塞模型的数学描述

现在讨论带有前鞘区的球形日冕瞬变事件顶部附近的问题. 取太阳中心为坐标原点,采用球坐标系,x 轴沿半径向外(图 3). 作为初步研究不考虑活塞的厚度. 认为活塞扰动区为等熵流动,无量纲、一维、非定常气体动力学方程组如下:

$$\frac{\partial a}{\partial t}+v\frac{\partial a}{\partial x}+\frac{\gamma-1}{2}a\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{nv}{x}\right)=0, \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{2}{\gamma-1}a\frac{\partial a}{\partial x}=-\frac{V_*^2}{x^2}, \tag{3.2}$$

式中 γ 为绝热指数,取 4/3. $n=2$ 相应于球坐标系,选用太阳半径作为典型长度 x_0,典型时间 t_0 取 $1h$,典型速度 $v_0=x_0/t_0$ 为 193.3km/s. a 为无量纲声速,定义为 $a=\sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}\Big/(x_0/t_0)$, $V_*=\left(\frac{GM}{x_0}\right)^{1/2}\Big/(x_0/t_0)$ 为无量纲引力速度,M 为太阳质量,G 为引力常数. x 和 t 分别是无量纲长度和时间.

明亮稠密压缩区与后面的低密度暗区以活塞分界. 方程式(3.1)和(3.2)对两个区域分别求解. 解此方程组需要两个边界条件,一是活塞运动速度,它对两个区域都相同,根据观测决定. 参考从日冕图的数值分析得到的前鞘前缘及明亮区导边的运动速度[4,5],取无量纲活塞速度:

$$Vp\begin{cases}0.31t-0.3, & 1\leqslant t\leqslant 2,\\ 0.32, & 2<t\leqslant 4,\\ 0.94, & t>4.\end{cases} \tag{3.3}$$

$t=4$ 时刻,活塞速度突然增加,标志主要质量喷射开始. 另一边界条件取决于活塞扰动区与静止日冕的联结条件,前鞘区前缘有一个小的激波间断,在这里激波前后量应满足守恒关系.

$$v_s=\frac{2}{\gamma+1}\frac{1}{N}(N^2-a_1^2), \tag{3.4}$$

$$a_s=\left\{\left[\frac{\gamma-1}{\gamma+1}+\frac{2}{\gamma+1}\left(\frac{a_1}{N}\right)^2\right]\left[\left(\frac{a_1}{N}\right)^2+\frac{2\gamma}{\gamma+1}\left(1-\left(\frac{a_1}{N}\right)^2\right)\right]\right\}^{1/2}N, \tag{3.5}$$

其中下标"1"指静止日冕中的量,"s"指激波后,前鞘区中的量,N 为激波传播速度,即瞬变前鞘区的图象移动速度,其中

$$a_1(x)=\sqrt{\frac{\gamma-1}{x}}V_*. \tag{3.6}$$

满足方程式(3.6)意味着满足静止日冕中的静态平衡关系,

$$\frac{dp}{dx}=-\rho\frac{GM}{x^2}. \tag{3.7}$$

稀疏区内边界以速度$-a_r(x)$向太阳表面方向移动．$a_r(x)$由(3.6)式决定．这里$V_r=0$．稀疏区内边缘在$x=1.1x_0$处截断．

$t=4$时刻，后期快速活塞运动开始，活塞前明亮的高密度压缩区与前鞘区以一激波相联结．这个激波前后的量也满足(3.4)及(3.5)式．在这里下标"1"相应于这个激波前前鞘区的量，"s"指激波后高密度压缩区中的量．

活塞在$t=1$时，$x=1.2$处以一有限初速度开始向前运动．初始声速满足(3.6)式，初始流速根据(3.3)式决定．按照平面活塞的分析结果决定初始间断，采用特征线法数值研究初始间断的发展及活塞扰动区流场．

四、计算结果及与观测比较

图 4 为模拟瞬变事件的一个计算结果．瞬变事件包括四个区域：活塞前的前鞘区、高密度压缩区、活塞及活塞后的低密度稀疏区．图 4 上给出了各区边缘位置随时间的演化关系．模型计算中，前鞘区外缘速度在 150—220km/s 范围内，变化不大，接近于一常数．高密度前缘的速度在 220—260km/s 之间变化．活塞运动形成的第一次和第二次激波的传播速度就是观测的图象运动速度．由于这两个速度相近，随着时间的发展，前鞘区形状变化不大．在这个计算实例中，后者的速度略大于前者，使前鞘区的宽度随时间演化略有减少．模型计算的前鞘区宽度在 1—2$R_\odot$范围内变化．

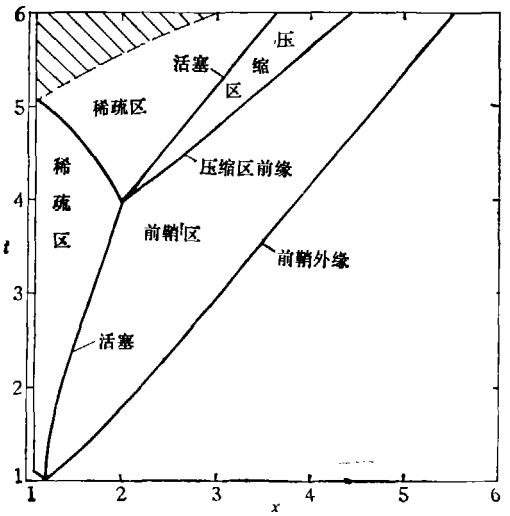


图 4　活塞及激波位置

图 5 和图 7 分别为 t = 5.6 时刻活塞前压缩区及活塞后稀疏区密度分布．图 5 中ρ_0为前鞘区前未扰动的日冕的密度；图 7 中ρ_p表示活塞后面上的密度．图 5 表明，前鞘的前缘处激波强度很弱，前缘后物质密度较静止日冕密度增加不到 1 倍．离高密度区边缘越近，密度越大．跨过第二次激波，密度突然增大，达到瞬变前密度的 9 倍．离活塞越近，密度越大．瞬变事件中的密度最大值，在活塞前面上，为静止日冕物质密度的 16 倍．活塞面前后，密度有一间断．活塞面后的密度为最低值．图 7 给出稀疏区的密度分布，沿x轴向内，密度逐渐增加到静止日冕中的密度值．

具有前鞘区的瞬变事件活塞模型计算的前鞘区、压缩区和稀疏区的速度场分别表示在图 6 和图 8 中．前鞘区前缘处，物质流速突然增加．离高密度压缩区边缘越近，前鞘区中的物质流速越小．在第二次激波前缘，物质流速再一次突然增加．在高密度压缩区中，离活塞距离越近，流速越小．图 8 表明，稀疏区中，离活塞越远，流速越小，大致线性地趋于稀疏区内边界上的零值．显然，在我们的模型中，物质的运动速度不同于结构图象速度．

按照日冕瞬变的活塞模型，静止日冕的状态确定之后，激波位置、激波传播速度和强度都取决于活塞运动的规律，即取决于太阳表面喷射物质的能量释放过程．与产生前鞘相对应的

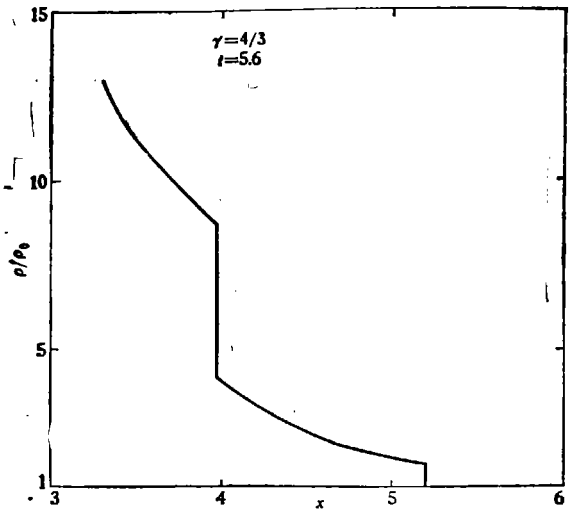


图 5 压缩区密度分布

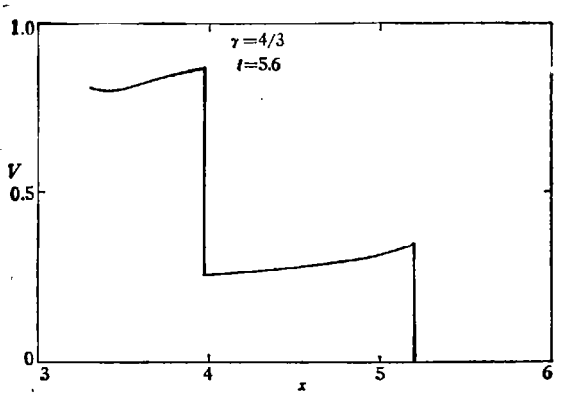


图 6 压缩区流速分布

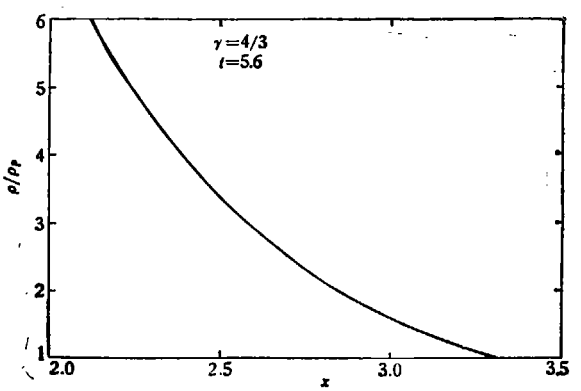


图 7 稀疏区密度分布

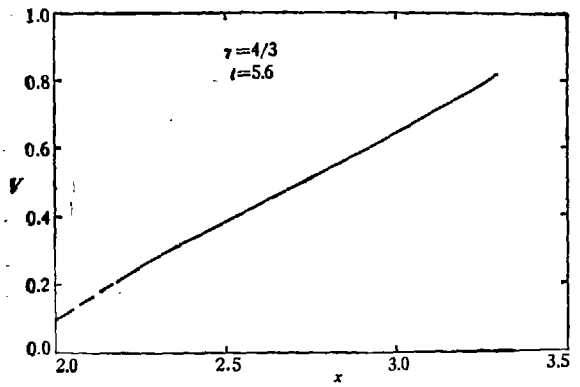


图 8　稀疏区流速分布

活塞动能很小，稍有加速，因而第一次压缩激波强度很小．后继的活塞速度加大，形成较强的激波．如果在前鞘期及后继期中活塞运动加快，在活塞前的区域中将会有较大的密度和流速．由于要克服太阳的引力，必然要消耗物质的内能和动能，前者是主要的．在活塞运动初期，物质流动加速[10]．因而形成了图 5 和图 6 所示的，活塞前区域中的密度和流速分布．

现在，我们从几何位形、运动学和动力学三方面将计算结果与大尺度日冕瞬变事件的观测结果相比较．应该指出，日冕仪观测到的明亮区域对应于局部高密度区，而暗区域对应于低密度区．

观测指出，前鞘区的空间位形与它后面的主要质量爆发事件是相似的（图 1）．观测的前鞘区外缘与明亮压缩区前缘有相近的运动速度，在演化过程中，一直维持着形状接近相同的前鞘区．较好的观测还表明，前鞘区域随时间演化多少稍有减少．这些关于日冕瞬变事件空间位形的观测与计算结果定性一致．观测的明亮前缘速度在 100—800km/s 之间不等[4,5]；计算的高密度压缩区前缘速度为 220—260km/s．观测的前鞘区宽度在 $0.7—3.0R_\odot$ 之间变化；模拟计算的前鞘区为 $1—2R_\odot$ 宽．模拟计算值都在观测范围之内．

瞬变事件日冕图的数值分析指出，在同一时刻，前鞘区中的密度增加量随距明亮前缘的距离加大而减小．在明亮前缘上，密度值突然增加，约为静止日冕中物质密度的 10 倍．计算结果与观测值相当符合．模拟计算的稀疏区对应于地面日冕仪观测到的低密度暗区域，目前观测不到瞬变事件中物质的运动速度．

12 个带前鞘区的日冕瞬变事件观测数据的分析比较表明[5]，一般说来，明亮前缘向外运动速度越快，对应的前鞘外缘速度越大，前鞘前缘领先于明亮前缘的时间就越短，前鞘区宽度越窄，但前鞘区总质量越大，因而密度越大．这些观测分析结果都可以用较快的活塞运动产生较大的激波强度和传播速度来解释．观测还指出，在 $2R_\odot \leqslant R \leqslant 6R_\odot$ 范围内没有观测到单独存在的前鞘区．按照活塞模型，这可解释为产生前鞘区的活塞运动和后期快速活塞运动的开始都在 $2R_\odot$ 以下．所以在日冕仪观测可见的 $2R_\odot—6R_\odot$ 范围内，同时见到这两个区域．模型计算的瞬变速度与前鞘边缘的领先时间关系与观测统计一致[5]．用活塞模型可以很好地解释这个关系．如果事件中太阳表面喷射物质比较多或运动速度比较大，活塞运动速度就比较快，而后期大量或快速物质喷射发生在 $2R_\odot$ 以下，因而前鞘前缘领先于明亮导边的时间就比较短．

我们要指出，在这个例子中采用了一系列假定．例如，一维球对称活塞，等熵流动，无限薄活塞．因此，计算结果仅适应于球形或环形瞬变事件的顶部附近，它们不会和观测数据完全一致．

五、结 论

强引力场中日冕瞬变事件的活塞模型将前鞘区、高密度压缩区和低密度稀疏区看作一个整体的动力学过程，研究它的整体图象和演化过程．详细地比较表明，无论在结构外形，运动学和动力学演化那一方面，计算结果都与大尺度日冕瞬变观测定性地一致．比较合理地解释了带有前鞘区的日冕瞬变现象．作为活塞的爆发日珥或耀斑，在主要的能量释放之前似乎存在着一个缓慢的爆发过程，形成一个微压缩前鞘区．一段时间之后，主要能量释放，活塞运动突然加速，形成太阳日冕的第二次压缩，产生明亮的高密度区．瞬变的前缘以激波传播速度在静止日冕中向前运动．前鞘前缘的传播速度和前鞘区的密度变化可以给出它后面的主要质量喷射事件的某些信息．

本文中，我们将日冕瞬变的活塞模型推广到具有前鞘结构的事件，对前鞘结构的观测特性首次进行了理论解释．我们将爆发日珥或者太阳耀斑爆发抛射的物质以及与此关联的磁结构都归之为一"活塞"．这样，日冕瞬变的驱动力就归之为活塞的运动．更进一步，我们需要研究"活塞"的结构，即分析其中的磁场位形和等离子体状态，这将有助于理解产生日冕瞬变事件的巨大能量来源，以及解释弧或泡中的非均匀结构．

参 考 文 献

[1] Munro, R. H. et al., *Solar Phys.*, **61**(1979), 201.
[2] Hildner, E., *Bull Amer. Astron. Soc.*, **13**(1981), 861.
[3] MacQueen, R. M. et al., *Astrophys. J. Letter*, **187**(1974), L85.
[4] Jackson, B. V. and Hildner, E., *Solar Phys.*, **60**(1978), 155.
[5] Jackson, B. V., *ibid.*, **73**(1981), 133.
[6] Hu, W. R., *Astrophys. and Space Sci.*, **92**(1983), 373.
[7] Hu, W. R., *ibid.*, 92(1983), 395.
[8] Hu, W. R., and Tang, Z. M., *ibid.*, **100**(1984), 391.
[9] 胡文瑞、唐泽眉，天体物理学报，**5**(1985)，148．
[10] 唐泽眉，力学学报，**17**(1985)，6：499