第11卷 第4期 空间科学学报 Vol. 11, No. 4
1991 年 10 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1991

耀斑后环珥系速度场的定量研究

顾啸马 林 隽 李秋莎
(中国科学院云南天文台，昆明)

摘 要

本文研究了在太阳重力、偶极磁压强梯度和气体压力梯度联合作用下环珥系内物质的下落运动，并在等温、定常假设下用数值方法计算了该环系的二维视向速度场。通过将速度场的理论计算跟文[1]中给出的观测速度场拟合，导出了该环系的有关参数及分布。计算表明环系内物质密度和磁场强度对物质下落运动影响较显著。

关键词 耀斑，环系，速度场

一、引 言

1984 年 2 月 18 日，在太阳大黑子活动区 (N15°, L115°, Boulder SESC4421) 上空产生了一个 X2.3/2B 级耀斑，它延续了 103 分钟接着形成一个较大的环系(N16°E81°)。我们对它进行了 Hα 色球观测和 Hα-SSHG 光谱观测，文[1]中已给出了该环系的观测、形态和二维视向速度场。为了进一步了解耀斑后环系的动力学性质，有必要对环系内物质运动作深入的定量研究。

在耀斑主相后期，耀斑环内的物质通常是由环顶向下运动，这似乎已成为耀斑后环内物质运动的主要特征之一。探索环内物质下落运动的基本规律对建立正确的耀斑模型具有重要意义，它已成为耀斑动力学研究的重要内容之一。Engvold 等人[2]首次提出环内物质在太阳重力作用下自由下落的思想，并得到理论计算与观测相符的结果。以后 Lategan 等人[3]和崔连竖等人[4]用观测进一步证实了自由下落的思想，接着顾啸马等人[5]发展了这一思想，提出环内物质在重力和磁场梯度力共同作用下沿螺旋形磁力线下落的设想，理论计算跟 1981 年 4 月 27 日耀斑后环的 Hα-SSHG 观测结果符合较好。

一般情况下环内等离子物质的分布可能是不均匀的，尤其在环足附近。在文献[1]—[5]的研究中都假设环内物质密度是均匀的，因此忽略了气体压力梯度对物质下落运动的影响。但是同时考虑磁场压力梯度和气压梯度对物质下落运动的影响至今尚无人作出定量研究。本文根据 1984 年 2 月 18 日环系的 Hα-SSHG 观测资料，并在文献[5]的研究基础上引进了大气压力梯度力和采用偶极磁场，在温度为常数和定常 $\left(\frac{\partial}{\partial t}=0\right)$ 的条件下首次用数值方法求解环内物质的运动方程，并使理论计算结果跟观测很好地拟合从而

本文于 1990 年 7 月 20 日收到。
* 中国科学院基金资助课题。

得到了环内有关参数及分布.

二、理论速度场计算

由文献[1]可知,该环系的 Hα-SSHG 观测资料是在 4 分钟时间内扫描取得的,每帧光谱的暴光时间是 5 秒. 除耀斑的脉冲相外,对于耀斑后环,在观测的数分钟内环内的速度、密度、磁场和温度等物理量都不会产生明显变化,因此我们完全可以将一次扫描的光谱资料看作(准)同时获得的,这样可以不考虑这些物理量随时间的变化. 另外本文为简化起见将环系内等离子体物质作为完全导电的理想流体处理.

根据文献[1]中的观测模型,给出该梯型的剖面(垂直于磁中性线的平面)示意图(如图1(a)所示). 这里 H_0 为环顶高度,$M(x,y)$表示由环顶开始作沿环下落运动的一团磁场较弱的等离子物质,$\boldsymbol{V}$ 为沿环的切向速度矢量,h 和 y 分别是它在天平面上的投影和真实高度. 因此M处等离子团的动量方程、连续性方程和物态方程依次为

$$\rho\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}=\rho\boldsymbol{g}+\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B}-\nabla P, \tag{1}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{V})=0, \tag{2}$$

$$P=2kT\rho/m_H. \tag{3}$$

这里 $\boldsymbol{g}$ 是随高度变化的重力加速度矢量,其他符号具有通常的含义.

大量的观测表明,活动区上空的磁场为偶极场,环的形式可以用某个偶极场磁力线来表示[6,7],因此磁场随高度的变化可用下列形式给出[8]:

$$B=\frac{B_0}{(1+y/d)^3} \tag{4}$$

这里 B_0 是光球表层的磁场强度,d 是偶极子深度. 因为研究的高度范围是从光球层延伸到日冕,故平均取 $d=1.0\times10^4$km.

由(4)式表明环顶处磁场较弱,因此当来之环顶的等离子团进入有磁场梯度的偶极场时主要受到磁压力的作用,磁张力的作用较小,可不予考虑. 所以(1)式中电磁力 $\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B}=-\nabla\left(\frac{B^2}{8\pi}\right)+\frac{1}{4\pi}(\boldsymbol{B}\cdot\nabla)\boldsymbol{B}\approx-\nabla\left(\frac{B^2}{8\pi}\right)$. 由于 $\frac{d\boldsymbol{V}}{dt}=\left(\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{V}$,在定常状态下 $\frac{\partial}{\partial t}=0$,所以 $\frac{\partial\boldsymbol{V}}{\partial t}=0$,$\frac{\partial\rho}{\partial t}=0$. 动量方程可写成如下形式:

$$\rho(\boldsymbol{V}\cdot\nabla)\boldsymbol{V}=\rho\boldsymbol{g}-\nabla\left(\frac{B^2}{8\pi}\right)-\nabla P, \tag{5}$$

而连续性方程成为

$$\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{V})=0. \tag{6}$$

此外,Petrasso 等人[9]对 1973 年 7 月 29 日的耀斑环系进行研究表明环系内的温度几乎是相同的. 本文在磁场冻结条件和 $T=$ 常数的假设下求解方程组(5)、(6)和(3),并利用(4)式. 由于物质下落运动、太阳重力、磁场和磁压梯度及气体压力梯度等量都只随高度

变化，因此可简化为一维问题计算.

将重力、磁压梯度力和气压梯度力投影到环的切线方向后等式两边消去 $\sin\theta$，(5)式可写成如下形式：

$$\rho v\frac{dv}{dy}=-\rho g(y)-\frac{d}{dy}\left(\frac{B^2}{8\pi}\right)-\frac{d}{dy}P, \tag{7}$$

由(6)式得

$$\rho v=K, \tag{8}$$

这里 K 为跟高度 y 无关的常数. 重力加速度随高度的变化规律为

$$g(y)=\frac{g_0}{(1+y/R_\odot)^2}, \tag{9}$$

这里 $g_0=GM_\odot/R_\odot^2$ 为太阳表面的重力加速度，$R_\odot$ 为太阳半径. 将(3)、(4)和(8)、(9)式代入(7)式微分整理后得

$$\left(1-\frac{2kT}{m_Hv^2}\right)\frac{dv}{dy}=-\frac{g_0}{v(1+y/R_\odot)^2}+\frac{3B_0^2}{4\pi Kd}\frac{1}{(1+y/d)^7}, \tag{10}$$

令氢原子热运动速度 $\sqrt{\frac{2kT}{m_H}}\equiv\xi$，$\frac{3B_0^2}{4\pi Kd}\equiv E$，(10)式为

$$\frac{dv}{dy}=-\frac{g_0}{v(1+y/R_\odot)^2[1-(\xi/v)^2]}+\frac{E}{(1+y/d)^7[1-(\xi/v)^2]}, \tag{11}$$

(11)式中第一项为负值表示重力作用向下运动(这里规定向上为正，向下为负)；第二项为正表示磁压力和气压力梯度阻止物质下落运动. (11)式是一个一阶常微分方程，它的解不能用解析式表示，只能在某个定解条件下求数值解.

为了导出切向速度 v 和视向速度 $v_{//}$ 之间的关系，我们将原坐标系 o-xyz (图 1(a))经两次变换后成为新坐标系 o-$x''y''z''$ (图 1(b))，即先将 xy 坐标面绕 y 轴顺时针旋转 ϕ 角成为一个新坐标系 o-$x'y'z'$，再将该新坐标平面 $x'z'$ 绕 z' 轴顺转一个角度 ψ 成为最后的新坐标系 o-$x''y''z''$(见图 1(b)) 这里 y 和 y' 轴重合，z' 和 z'' 轴重合，ox'' 轴指向视线方向，故 $Vx''=v_{//}$. 根据以旧坐标表示新坐标的变换公式，并考虑到 $(V_x,V_y,V_z)=(v\cos\theta,-v\sin\theta,0)$，则有

$$\begin{pmatrix}V_x''\\V_y''\\V_z''\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos\psi&-\sin\psi&0\\\sin\psi&\cos\psi&0\\0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\varphi&0&\sin\varphi\\0&1&0\\-\sin\varphi&0&\cos\varphi\end{pmatrix}\begin{pmatrix}v\cos\theta\\-v\sin\theta\\0\end{pmatrix}. \tag{12}$$

由此可得

$$v_{//}=v(\cos\psi\cos\theta\cos\varphi+\sin\psi\sin\theta), \tag{13}$$

这里 φ 是环平面跟视线方向的夹角，θ 和 ψ 在图 1(a) 中标明.

观测表明环内物质是沿环运动的[2,4]，而环的一般形状是椭圆形，适当选择半长轴和半短轴后可用一个椭圆方程式表示环内物质运动轨迹.因此由图1(a)可得到下列关系式：

$$\left(\frac{x}{b}\right)^2+\left[\frac{y-(H_0-a)}{a}\right]^2=1, \tag{14}$$

$$\cos\theta=\left[1+\left(\frac{a}{b}\right)^2\frac{(H_0-y)(2a-H_0+y)}{(y-H_0+a)^2}\right]^{-1/2}, \tag{15}$$

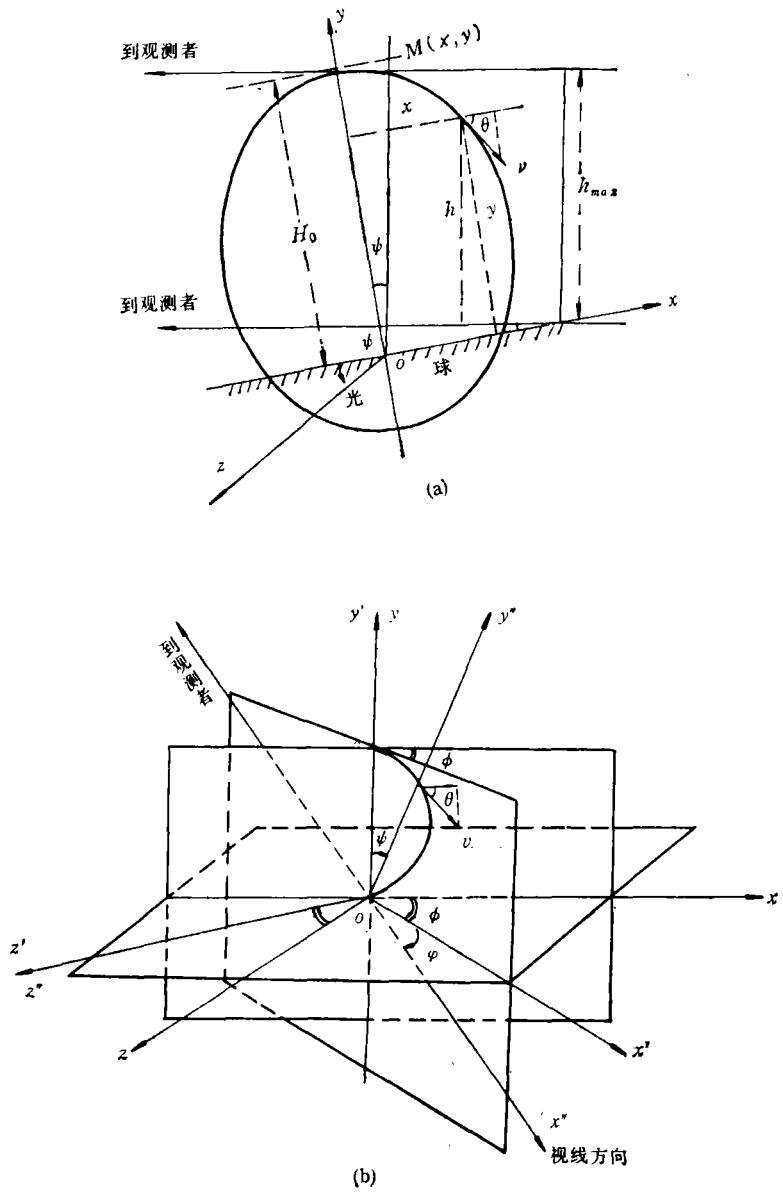


图 1

(a) 环内物质由环顶沿环腿下落运动示意图

(b) 直角坐标系变换示意图

ox 为光球水平方向， *oy* 为垂直方向(太阳半径方向)

o-xy 为环平面， *oz* 指向环的法线方向

Fig. 1

(a) The scheme of downflow along the loop. (b) The scheme of coordinate system transformation. *ox* parallels to surface of photosphere, *oy* to radial direction of the Sun, *o-xy* is the plane where loop locates and *oz* is vertical to this plane

$$h = \left[y - \left(2R_\odot \sin\frac{\phi}{2} - x \right) \mathrm{tg}\,\phi \right] \cos\phi, \tag{16}$$

$$h_{\max} = (H_0 - \Delta)\cos\phi, \tag{17}$$

这里 $\Delta = 2R_\odot \sin\frac{\phi}{2}\mathrm{tg}\,\phi$，$a$ 和 b 分别为椭圆环的半长轴和半短轴．根据文[1]的观测分析可知，$\phi = 9°$，此外，环的长轴跟太阳径向之间有 30° 的倾角 α，故M点的有效高度为 $y\cos\alpha$，计算时用它替代(11)式右边第一项的 y．环的极大投影高度 $h_{\max}$ 由观测确定．

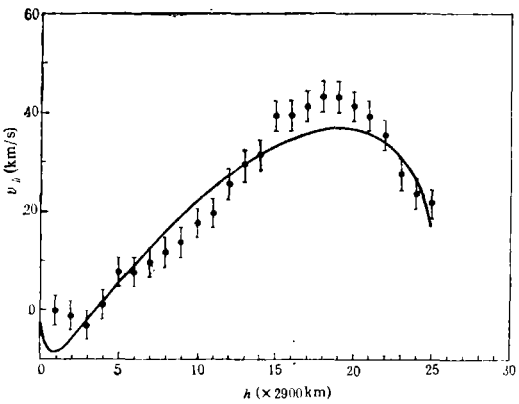
本文采用 Merson 方法[10]将(11)式跟(13)式联立求解，并运用了关系式(14)—(16)．边界条件为

$$v|_{y=0} = v_0, \tag{18}$$

v_0 是物质在光球层的速度．在方程组中包括了下列一组参数：$a, b, \varphi, B_0, \rho_0, T$ 和 v_0，其中 ρ_0 为光球层的密度．给定这组参数值，由上列方程组和边值条件(18)可唯一地算出一条 $v_{//}$ 随投影高度 h 的分布曲线，把它跟观测的 $V_{//}$-h 曲线比较．若两者不符合，则再改变这些参数值重复上列计算过程，直到算出的曲线跟观测结果"满意"地吻合为止．我们将拟合误差

$$rms = \left[\sum_{i=1}^{n} (v_i' - v_i^0)^2 / n(n-1) \right]^{1/2} \tag{19}$$

$\leqslant 2\mathrm{km/s}$ 作为"满意"的判据．这里 v_i' 和 v_i^0 分别为第 i 个测点速度的计算值和观测值，n 为测点数．用云南天文台的 VAX-8350 计算机完成上列计算，计算高度范围约为 8—9×10^4km，计算步长 10km．图 2 给出了文[1]中图 3 的第 22 帧光谱画幅理论计算的 $V_{//}$ 随 h 的分布曲线和对应的一组最佳参数值，同时也给出了观测值随 h 的分布以便比较．图 3 给出了 ρ_0、B_0 和 T 单独变化时对 $v_{//}$-h 曲线的影响．

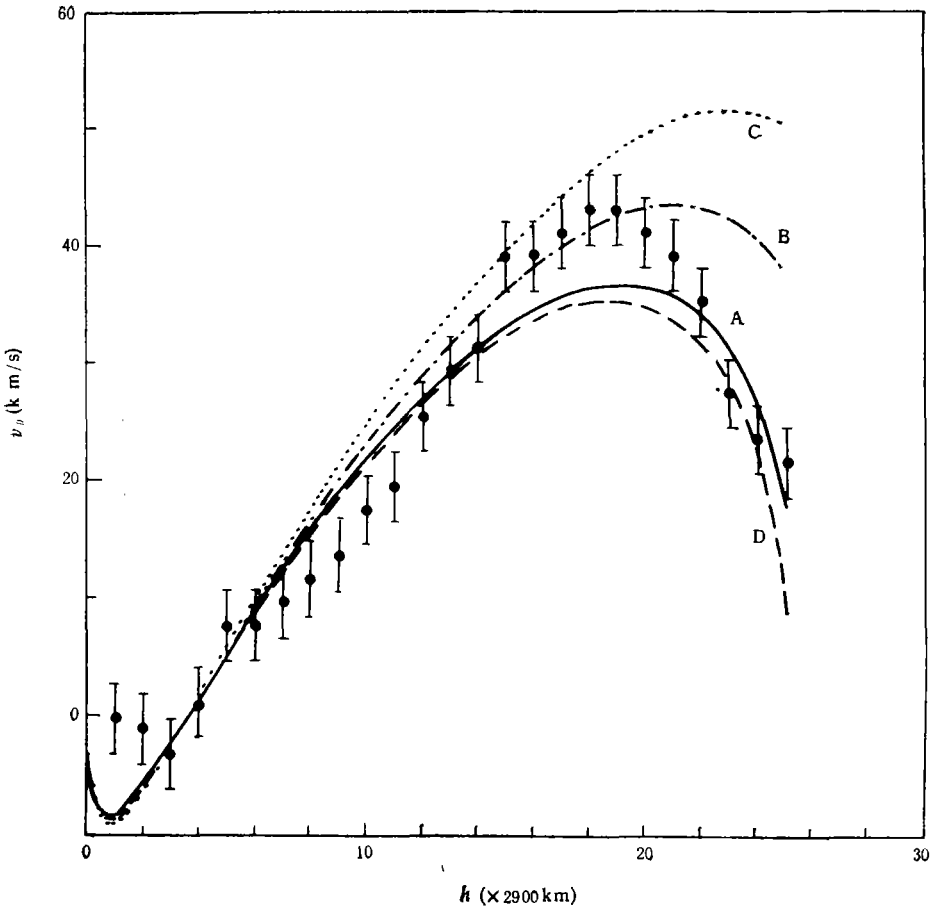


$a = 1.024 \times 10^{10}\mathrm{cm}$，　$b = 0.848 \times 10^{10}\mathrm{cm}$

$\phi = 30°$，　$B_0 = 88\mathrm{Gs}$，　$V_0 = -2.4 \times 10^6\mathrm{cm \cdot s^{-1}}$，　$\rho_0 = 7.498 \times 10^{-12}\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$，　$T = 10^4\mathrm{K}$

图 2　视向速度随高度的分布曲线

Fig. 2　Velocity in line-of-sight versus height



Curve A: $a = 1.024 \times 10^{10}$cm, $b = 0.848 \times 10^{10}$cm, $\phi = 30°$, $B_0 = 88$Gs, $V_0 = -2.4 \times 10^6$cm·s^{-1} $\rho_0 = 7.498 \times 10^{-12}$g·cm^{-3}, $T = 10^4$K

Curve B: $\rho_0 = 7.163 \times 10^{-12}$g·cm^{-3},other parameters are the same as those for Curve A;

Curve C: $B_0 = 92$Gs, other parameters are the same as those for Curre A;

Curve D: $T = 7 \times 10^3$K other parameters are the same as those for Curve A;

图 3 $v_{//} \sim h$ 的理论曲线同 H_α-SSHG 观测结果的比较

Fig. 3 Comparision of theoretical curve $v_{//}$-h with observational ones

三、结果和讨论

利用上述方法对文[1]中图 3 的31个光谱画幅(其中的第 10 画幅未作光度测量)进行了计算，并将计算结果平滑后按空间位置排列得到环系的理论视向速度场 (图 4)。每个画幅(第 10 画幅除外)经拟合后得到所对应的一组最佳参数值列于表 1 中，每个画幅的拟合误差 *rms* 也在表 1 中给出。

1. 理论视向速度分布与观测的比较

a) 比较文[1]中图8(a)和图 4 可以发现，从两者速度分布的形态、结构、速度值大小、

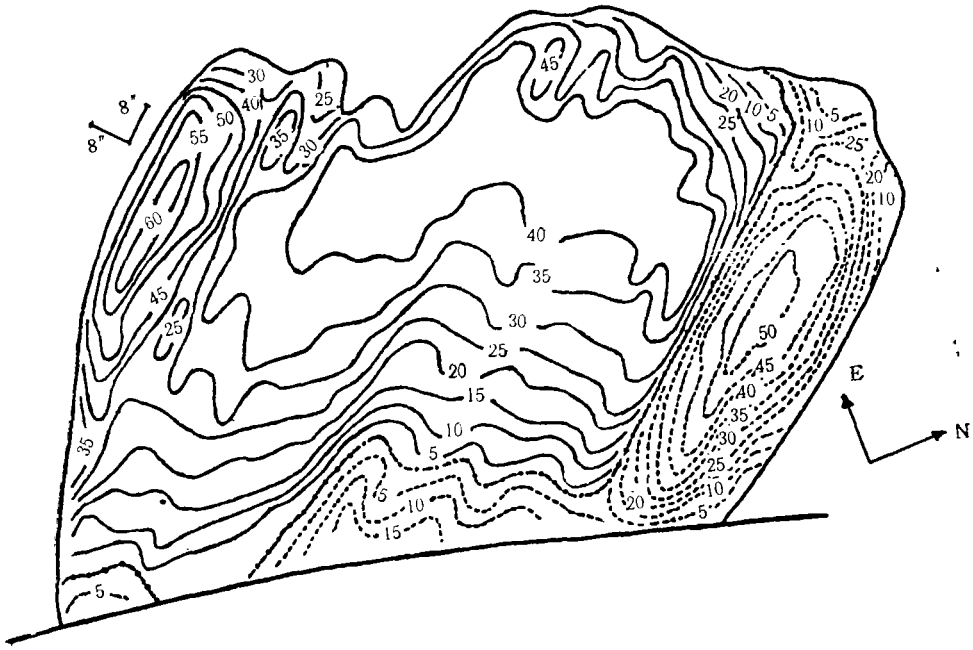


图 4　理论视向速度场(实线为红移速度，虚线为紫移速度，点虚线表明零速度．速度单位 km·s^{-1})

Fig. 4　Theoretical field of velocity in line-of-sight. Solid lines imply red-shift, dash lines, blue-shift and point and dash lines are the zero-velocity lines. Unit of velocity is km·s^{-1}

零速度线的数目、位置和走向等都吻合得很好，这充分表明每个光谱画幅的理论计算跟观测的拟合都比较好；同时也表明本文采用的理论速度场跟观测速度场拟合这样一种思想和方法是可行的．

b) 由图 2 可知，在环足附近 $V_{//}$ 的绝对值在达到极大后又逐渐减小形成速度的“折回”，而在环足附近速度的观测值也出现了“折回”，两者是完全一致的．值得强调的是这种“折回”的产生不是投影效应所致，而是气体压力梯度 $-\nabla P$ 作用的结果．因为在环足附近气压梯度比环的其他地方更大，尽管在那里投影角 θ 仍然在减小，但是较大的气压梯度力使下落速度不断地减小形成了 $v_{//}$ 的“折回”．在环足附近这种速度的减小在文[2]给出的观测实例中也有反映(文[2]中的图 7)．由图 3 还可看出，这种速度的“折回”跟参数无关，它并不因某些参数(如 ρ_0，B_0 和 T)的改变而消失．

2. 理论曲线和参数选择的关系

图 3 表明参数取值不同所得到的图形有明显的差异，尤其是 ρ_0 和 B_0 的变化对理论速度分布有很大影响．

a) B_0 的大小决定了磁压力梯度的大小，它反向于重力阻止物质下落，如果 B_0 足够大则物质将无法下落，只有初速较大的物质才能继续下落，图 3 中曲线 A 和 C 表明这一点．

b) ρ_0 的变化对 $v_{//}$ 的影响十分明显，ρ_0 较大则表明环内物质较稠密，物质下落运动

表 1 最佳参数值分布表

画幅序号	V_0 ($\times 10^6$cm/s)	B_0 (Gs)	ρ_0 ($\times 10^{-12}$g/cm^3)	ϕ (°)	a (10^{10}cm)	b ($\times 10^{10}$cm)	T ($\times 10^4$K)	rms (km/s)
1	−2.5	97	8.619	15	1.184	1.520	1.0	1.327
2	−2.5	97	8.401	14	1.160	1.520	1.0	1.568
3	−2.4	90	7.397	30	1.232	1.320	1.0	1.420
4	−2.4	90	7.364	52	1.000	1.240	1.0	0.681
5	−2.4	90	7.615	48	1.068	1.240	1.0	0.830
6	−2.4	90	7.949	47	1.056	1.240	1.0	0.671
7	−2.4	90	7.648	42	1.480	1.240	1.0	0.913
8	−2.4	90	7.648	44	1.216	1.056	1.0	0.927
9	−2.4	90	7.648	44	1.216	1.056	1.0	0.790
11	−2.4	90	7.481	47	1.056	1.056	1.0	0.863
12	−2.4	90	7.113	42	1.400	1.056	1.0	0.622
13	−2.4	90.5	7.079	40	1.400	1.056	1.0	0.609
14	−2.4	90.5	7.079	40	1.400	1.056	1.0	0.968
15	−2.4	90	7.113	45	1.160	1.056	1.0	1.062
16	−2.4	88	7.196	34	1.024	1.056	1.0	1.179
17	−2.4	88	7.247	34	0.960	1.056	1.0	0.861
18	−2.4	88	7.297	34	0.960	1.056	1.0	0.826
19	−2.4	88	7.297	35	1.000	1.040	1.0	1.056
20	−2.4	88	7.297	35	1.000	0.976	1.0	0.982
21	−2.4	88	7.447	30	1.056	0.816	1.0	0.993
22	−2.4	88	7.498	30	1.024	0.848	1.0	0.860
23	−2.4	89	7.782	25	1.000	0.816	1.0	1.214
24	−2.4	89	7.816	18	0.952	0.864	1.0	1.543
25	−2.4	89	7.816	18	0.968	0.864	1.0	1.446
26	−2.4	89	7.816	20	1.288	0.768	1.0	1.491
27	−2.4	89	7.816	18.5	1.040	0.920	1.0	1.327
28	−2.4	89	8.067	21.5	1.258	0.920	1.0	0.921
29	−2.3	89	8.703	0	1.160	0.160	1.0	0.965
30	−2.3	89	8.954	28	0.840	0.160	1.0	1.001
31	−2.3	89	9.171	30	0.798	0.160	1.0	1.204
32	−2.2	89	10.794	40	0.664	1.000	1.0	1.487

中将受到较大的阻力(原子间碰撞增多),故速度就变小,比较图 3 中曲线 A 和 B 可说明这一点.

c) 温度 T 的改变对 $v_{//}$ 的分布影响很小,这可从图 3 中曲线 A 和 D 的比较中得到证明. 这表明在温度为常数的假设下,T 的改变对 $v_{//}$ 的影响不明显.

d) 计算表明, a、b 和 ϕ 这些几何参数对 $v_{//}$ 的影响也是明显的, 因此通过观测确定它们的值或取值范围是很重要的. 王家龙等[11]对如何由观测确定环的形状和方位等做过较详尽的研究,值得借鉴.

e) v_0 是物质下落到光球表层时的速度,它是一个边界条件, 因仍然未知我们将它作为一个未知参数跟其它参数一道进行归算.

只要我们有更精确的观测数据, 依据环系和活动区的具体条件细致地调节这些参数

值还可以使理论图形跟观测拟合得更好.

3. 在本文的计算中由于有 7 个自由参数，似乎拟合并不困难，但我们可通过改进观测方法(如文[11]提供的方法)来确定几何参数以减少自由参数和不确定性，此工作有待今后进行.

4. 采用本文的思想和方法，通过使理论曲线跟观测值很好地拟合可达到测定环内有关参数(包括物理参数和几何参数)及其如像表 1 那样的分布之目的. 如果我们取得了某活动对象多波段的 SSHG 并具有时间序列的观测资料，那么根据本文方法就有可能得到不同高度上（对应于不同的谱线）该活动对象的有关参数的分布及它们随时间的演化过程.

5. 最近唐玉华等[12]指出：在研究耀斑环内物质运动时应考虑物质在环顶可能存在着较大的初速度. Forbes[13] 曾用磁场湮灭和快磁激波理论计算得出环顶物质的初速度可能达到 $1—2\times10^2$km/s. 但根据文[1]的观测对 1984 年 2 月 18 日的耀斑后环系并未观测到环顶有较大的视向速度，因此为计算方便本文没有考虑环顶有较大的初速度.

6. 量级分析给出 $\nabla P\sim\frac{nkT}{H_0}$，当环系的高度 H_0 较大时(如大于 10^5km，它对应于耀斑后期)，环内的温度和密度一般都较低，这时大气压力梯度力 $-\nabla P$ 跟重力相比可忽略，只要环内磁场梯度较小则自由下落模式是适用的. 如果环系高度在 $3—8\times10^4$km 内，并且 ρ 和 T 都较高时那末 $-\nabla P$ 的贡献就不能忽略.

四、结　论

二维速度场的理论计算跟观测结果很好地吻合表明本文为研究环系内物质下落运动一般规律所提出的模式和方法是可行的，它可同时确定环系内有关物理参数及分布. 环系内物质下落运动的规律除受太阳重力、磁场压力梯度和大气压力梯度力共同支配外还受到环系内某些物理参数的影响. 在等温条件下，密度和磁场强度对视向速度的影响较为显著.

感　谢

作者对 T. G. Forbes 博士给予本文很好的建议和讨论表示感谢，作者衷心感谢 B. Schmieder 博士对本文的兴趣和支持. 在计算过程中得到云南天文台 VAX 机房工作人员的支持深表感谢.

参　考　文　献

[1] 顾啸马和李秋莎，天体物理学报，第 7 卷，第 298 页，1987.
[2] Engvold, O., E. Jensen and B. N. Andersen, *Solar Phys.*, Vol. **62**, p. 331 1979.
[3] Lategan, A. H. and A.H. Jarrett, *Solar Phys.*, Vol. **76**, p. 323, 1982.
[4] 崔连竖等，天体物理学报，第 4 卷，第 279 页，1984.
[5] 顾啸马等，中国科学 A 辑，第 5 期，第 445 页，1984.
[6] Rust, D. M. and Bar, V., *Solar Phys.*, Vol. **33**, p. 445. 1973.
[7] Antiochos, S. K. and R. A. Sturrock, *Solar Phys.*, Vol. **49**, p.359, 1976.
[8] Takakura, T. and E.Scalise, *Solar Phys.*, Vol. **11**, p. 434, 1970.
[9] Tetrasso, R. D. et al., *Solar Phys.*, Vol. **62**, p. 133, 1979.

[10] 刘德贵等,FORTRAN 算法汇编(第一分册),国防工业出版社,第 418 页, 1984.
[11] Wang, J.L. et al., Proc. of Kunming Workshop on Solar Physics and Interplanetary Travelling Phenomena, Science Press, Vol. 1, p,455, 1985.
[12] 唐玉华和许敖敖,天文学报,第29卷,第 351 页, 1988.
[13] Forbes, T. G., *Ap. J.*, Vol. **305**, p. 553, 1986.

THE QUANTITATIVE RESEARCH ON THE VELOCITY FIELD OF A POST-FLARE LOOP PROMINENCE SYSTEM

Gu Xiao-ma Lin Jun Li Qiu-sha
(Yunnan Observatory, Academia Sinica, Kunming)

Abstract

The downward motion of the matter within the post-flare loop system of 1984 February 18 is studied under the joint action of solar gravity and the both gradients of dipole magnetic field pressure and atmospheric pressure. The two-dimensional line-of-sight velocity field is calculated by means of a numerical method under the assumption that the temperature keeps unchanged within loop system and the loops are quasi-closed. In the system, some parameters as well as their distribution are derived from the curve fit of both velocity fields between theory and observation. The calculations indicate that the effects of density and magnetic field intensity within the loop system on the downward motion of matter is comparatively large while the effect of the temperature is much small.

Key words Solar flare, Loop prominence system, Velocity field