

文章编号: 1000-8349(2008)04-0311-10



# 行星际磁通量绳尺度及能量研究

冯恒强<sup>1,2</sup>, 韩运侠<sup>1</sup>, 吴德金<sup>2</sup>, 赵寄昆<sup>3</sup>

(1. 洛阳师范学院 物理与电子信息学院, 洛阳 471002; 2. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008;  
3. 中央大学 太空科学研究所, 台湾 32054)

**摘要:** 行星际磁通量绳是太阳风中一种重要的磁结构。从 1995—2001 年的 Wind 卫星的观测资料中认证了 144 个行星际磁通量绳。其时间尺度介于几十分钟到几十小时之间, 其空间尺度呈现连续分布。通过估算磁通量绳单位长度的能量和总能量发现: 磁通量绳的能量分布和耀斑的类似都呈现很好的幂率谱。通过讨论行星际磁通量绳和太阳活动爆发的关系, 建议所有的小、中、大尺度通量绳都直接起源于太阳上的爆发, 和磁云对应于通常的日冕物质抛射一样, 中、小尺度的通量绳对应相对较小的日冕物质抛射。

**关键词:** 太阳物理学; 行星际磁通量绳; 行星际磁场

**中图分类号:** P181.9      **文献标识码:** A

## 1 引 言

行星际磁通量绳是太阳风中一种重要的磁结构。在早些时候, 一般认为行星际磁通量绳有两类。一类是磁云, 在行星际空间经常被探测到, 它们具有大尺度的结构, 直径约为 0.2~0.4 AU<sup>[1-4]</sup>。另外一类是 Moldwin 等人<sup>[5]</sup>在 2000 年发现的小尺度通量绳结构, 它们的持续时间仅几十分钟, 相应的空间尺度约 0.01 AU, 远低于一般的磁云的尺度。

磁云是行星际日冕物质抛射的一个重要子集, 磁云同时具有以下 3 个基本特征: (1) 磁场方向在大约一天的时间内发生大角度平滑旋转; (2) 具有相对较强的磁场; (3) 相对低的质子温度和等离子体  $\beta$  值<sup>[6]</sup>。目前一致认为磁云起源于太阳, 它们很可能最初是日冕内的小磁通量绳, 由于日冕内的某种扰动, 使它们上升进而爆发抛入太阳风中并在日地空间传播过程中持续膨胀, 到达 1AU 附近就是所观测到的磁云。由于磁云具有近似常  $\alpha$  无力场位形, 这

**收稿日期:** 2008-03-30; **修回日期:** 2008-06-06

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (40804034, 40574065, 10603014)

种低  $\beta$  的封闭磁场结构使整个系统处于最小能量状态, 能够长期维持下去, 它可能保留了日冕内磁通量绳的信息, 特别是各种冕环的磁结构的信息, 所以研究磁云对研究太阳活动的爆发环境、物理机制有重要意义。行星际磁云和磁层作用时, 其磁场的螺旋结构使它能够持续稳定地提供较强的南向磁场, 从而和磁层顶的北向磁场发生重联, 并导致强的地磁暴。所以研究磁云对空间天气预报也有重要作用。对磁云的观测、理论模型数值模拟和多重磁云等相关研究进展, 汪毓明等人<sup>[7]</sup>已经做了比较详细的介绍, 这里不再介绍。本文重点介绍中、小尺度行星际磁通量绳以及关于行星际磁通量绳尺度和能量谱研究方面的进展, 希望能够对行星际磁通量绳的进一步研究有所帮助。这里所谓的小尺度行星际磁通量绳是指其直径不大于 0.05 AU 行星际磁通量绳; 中间尺度的磁通量绳是指其尺度介于小尺度磁通量绳和磁云之间的磁通量绳, 其尺度范围在 0.05~0.2 AU 之间。

## 2 小尺度行星际磁通量绳的观测以及起源问题

相对于磁云, 关于小尺度行星际磁通量绳的报道和研究较少, 报道事件除了 1991 年 12 月 22 日 Ulysses 飞船在离地球约 5 AU 的木星附近观测到一个直径约为 0.05 AU 的磁通量绳事件外<sup>[8]</sup>, 还有 IMP8 和 Wind 于 1995—1997 年在地球附近观测到的 6 个平均直径约为 0.01 AU 的磁通量绳事件<sup>[5]</sup>。1991 年小通量绳事件是作为行星际磁场重联证据被报道的, 因为这个事件除了通量绳磁结构和磁云相似外, 不具有低的温度、密度、等离子体  $\beta$  值和较高的氦丰度等磁云常见特征, 其轴近似垂直黄道面。另外, 1991 年事件内观测到双向超热电子流, 并且存在热电子流中断 [Heat Flux Dropouts, HFD], 而存在热电子流中断意味着其磁力线没连接在日冕上。基于这些特征, Moldwin 等人<sup>[8]</sup>认为这个事件和磁云不是同一类现象, 磁云起源于日冕磁场重联, 而小尺度事件起源于日球电流片附近的重联。后来, Crooker 等人<sup>[9]</sup>分析了 Ulysses 飞船在 1 AU 附近记录的等离子体和磁场的特征, 认为太阳风扇形边界和日球电流片相互作用可能会产生一系列磁场复杂的扁平通量绳结构。

和 1991 年小尺度事件相比, Moldwin 等人<sup>[5]</sup>报道的 6 个磁通量绳事件的尺度更小, 持续时间仅为 40~100 min, 但是其内部等离子体  $\beta$  值较低。图 1 给出了 Wind 观测到的 1995 年 9 月 20 日小尺度通量绳的磁场随时间的变化曲线 (实线), 图中的垂直虚线是估计的通量绳的前后边界。由图 1 可以看出它具有典型磁通量绳磁场特征: 磁场强度中间高两边低,  $B_z$  分量发生方向反转。利用常  $\alpha$  无力场轴对称模型, 进行最小二乘法拟合<sup>[4]</sup>, 发现观测磁场和模型磁场 (图中点线) 符合得较好。利用 Wind 飞船观测数据拟合得到通量绳的半径为  $112R_E$  ( $R_E$  为地球半径), 通量绳轴心处的磁场强度为 8.6 nT, 卫星离通量绳轴的最近距离和半径的比为 0.01, 说明卫星几乎穿过通量绳的轴。Moldwin 等人<sup>[5]</sup>对这 6 个小尺度事件的特征进行了分析, 并和磁云进行了对比。发现它们除了尺度相差很大外, 小通量绳还没有出现低的质子温度和膨胀现象 (即速度轮廓较平, 没有出现前高后低的速度曲线)。另外, 虽然在这些小尺度通量绳中, 有的具有和磁云一样低的等离子体  $\beta$  值, 但是其中个别事件的等离子体  $\beta$  值明显 (0.8 左右) 高于磁云的等离子体  $\beta$  值。

鉴于这些小事件和磁云都具有通量绳磁场位形而又存在很多不同特征, Moldwin 等人<sup>[5]</sup>对这些小事件的起源给出了两种可能解释: (1) 小通量绳也起源于日冕内磁场重联, 和磁云

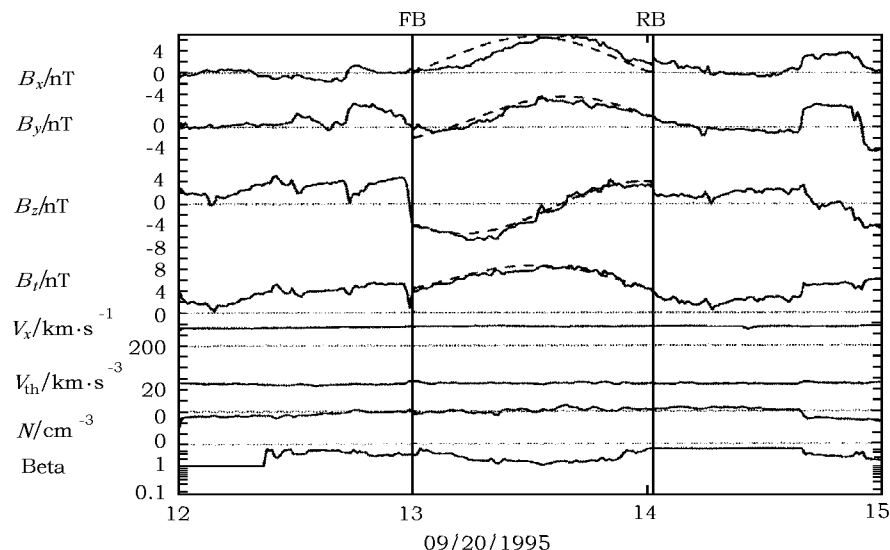


图1 1995年9月20日小尺度通量绳的磁场随时间的变化曲线<sup>[10]</sup>

实线来自 Wind 观测, 点线是用常  $\alpha$  无力场轴对称模型的拟合结果

是同一类现象, 只是尺度不同; (2) 小尺度通量绳和磁云并不是同一类现象, 磁云起源于太阳, 小通量绳起源于行星际空间, 是日球电流片处磁场重联的结果。Moldwin 等人还指出, 如果小通量绳和磁云是同一类现象, 其尺度分布应该是连续的, 但是在这么多年的磁云研究中, 从没有在地球附近观测到持续时间为几个小时的中等尺度磁通量绳事件, 所以他们认为小事件和磁云为同一种现象的可能性不大。另外, 这些小通量绳和 Crooker 等人<sup>[9]</sup> 提出的可能存在的小通量绳也完全不同, 不同点主要有以下几个方面:

- (1) Crooker 等人提出的是一系列事件而这些小事件都是单个被观测到的;
- (2) Crooker 等人提出的是扁平结构, 而观测到的则呈现轴对称结构;
- (3) Crooker 等人提出的是磁力线轻微旋转或者部分旋转, 而观测到的则有很好的平滑旋转;
- (4) Crooker 等人提出的小通量绳内具有较高的等离子体  $\beta$  值, 而观测到的则有低等离子体  $\beta$  值现象。所以这些观测到的小通量绳也不可能是 Crooker 等人建议的磁场复杂的扁平通量绳。

由于这些小尺度通量绳和磁云存在不同的等离子体特征, 而其径向尺度又和日球电流片厚度相近, 所以 Moldwin 等人<sup>[5]</sup> 认为小磁通量绳应该起源于行星际空间磁场重联。

### 3 行星际磁通量绳的尺度分布

是否行星际磁通量绳只有大尺度的磁云和小尺度的通量绳, 而不存在中间尺度的通量绳? Feng 等人<sup>[10]</sup> 分析了 1995—2001 年的 Wind 飞船观测的磁场和等离子体资料, 从中确认了 144 个行星际通量绳事件。通过对这些通量绳进行最小二乘法拟合计算了它们的直径, 发现它们的直径范围为 0.0036~0.6266 AU 且呈现连续分布, 而非小尺度与大尺度的“双峰”分布。

### 3.1 观测资料

在确认可能的行星际通量绳时, Feng 等人<sup>[10]</sup>采取的主要标准是通量绳的磁场特征, 即磁场方向的平滑旋转和相对较高的磁场强度。虽然低的等离子体  $\beta$  值、质子密度和温度是磁云的基本特征并常常作为认证磁云的主要判据, 但是在确认可能的行星际通量绳时并没有将其当作基本标准, 只是作为一个参考。之所以没有把这些等离子体特征作为主要标准, 是因为要确定的通量绳中包括很多直径约为 0.05 AU 甚至更小的中、小尺度通量绳。而中、小尺度的通量绳往往不具有较低的质子温度和密度, 甚至有些小尺度事件没有出现低的等离子体  $\beta$  值。最终确定这些候选事件的标准是看通量绳的几何位形和常  $\alpha$  无力场轴对称模型的偏差程度, 当观测的事件和轴对称模型的偏差超过某一给定标准值时, 便认为是行星际通量绳。观测事件和模型的符合程度可以用最小二乘法拟合得出的最小二次方差  $\chi^2$  来衡量,  $\chi^2$  越小说明符合得越好。这里给定的确定事件的标准值是  $\sqrt{\chi^2} = 0.3$ , 最终在 1995 年 1 月到 2001 年 9 月 Wind 飞船的卫星观测资料里, 确认了 144 个行星际通量绳。

由于大尺度的磁云和小通量绳都能够近似地满足常  $\alpha$  无力场轴对称模型, 这里也假设常  $\alpha$  无力场轴对称模型对于中等尺度的通量绳仍然适用。即所有通量绳的磁场位形都近似地满足 Lundquist 解<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} B_R = 0, \\ B_\theta = HB_0J_1(\alpha R), \\ B_Z = B_0J_0(\alpha R). \end{cases} \quad (1)$$

其中  $B_R$ 、 $B_\theta$ 、 $B_Z$  分别为径向、切向、轴向分量,  $B_0$  为通量绳轴上的磁场强度,  $H = \pm 1$  表示通量绳的螺旋性,  $+1$  为右手螺旋,  $-1$  为左手螺旋,  $J_0$ 、 $J_1$  分别为零阶、一阶贝塞尔函数,  $R$  为到通量绳轴的径向距离。因为所有的磁通量绳都近似地满足常  $\alpha$  无力场轴对称模型, 所以可以用最小二乘法拟合这些观测事件。

最小二乘法拟合通过以下步骤实现: (1) 将观测磁场无量纲化; (2) 用最小方差分析法 (Minimum Variance Analysis, 简称 MVA) 估计磁云的轴向, 建立通量绳坐标系 (即以通量绳的轴向为坐标系  $Z$  轴, 取卫星轨道方向为  $S$ , 则  $Z \times S$  的方向为  $Y$  轴, 最后  $X$  轴的方向可通过  $Y \times Z$  得到) 并确定通量绳的螺旋性。因为磁场方差分析标准模型显示, 当卫星穿过通量绳时, 方差改变最小、最大、中间的方向分别接近通量绳的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向。但是当卫星轨道离通量绳的轴较远时偏差很大; (3) 将无量纲化的观测磁场转换到通量绳坐标系, 然后求无量纲化观测磁场和模型磁场的卡方, 通过多次迭代最后求得最小卡方  $\chi^2$  从而确定轴的方向和卫星轨道离通量绳轴的距离 ( $d_0$ ) 为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N [(B_{x_C}^O - B_{x_C}^M)^2 + (B_{y_C}^O - b_{y_C}^M)^2 + (B_{z_C}^O - B_{z_C}^M)^2] / 3N. \quad (2)$$

上式中,  $N$  是所用磁场矢量的个数, 这里在拟合时对数据进行了 25 份平均, 即取  $N = 25$ 。上标 O 和 M 分别代表观测磁场和模型磁场, 下标 C 是指在通量绳坐标系; (4) 再用最小二乘法拟合确定磁云轴心的磁场强度; (5) 运用拟合结果和磁云速度的平均值, 通过空间关系, 可以得到通量绳的直径。通过最小二乘法拟合我们得到关于这 144 个行星际通量绳的拟合参数<sup>[10]</sup>。

对确定的行星际磁通量绳进行统计分析发现: (1) 尺度较小的 (直径小于 0.1 AU) 行星际磁通量绳很少有较低质子温度和密度, 几乎不存在膨胀现象; (2) 尺度在 0.1~0.2 AU 之间的部分行星际磁通量绳有较低的质子温度、密度和膨胀现象, 但在尺度上并没有明显的分界线以判断是否存在这些现象; (3) 多数尺度大于 0.2 AU 的行星际磁通量绳具有较低质子温度、密度和膨胀现象; (4) 较小尺度事件往往具有相对低的磁场强度, 但是尺度和磁场强度之间不是严格的线性关系。

### 3.2 行星际磁通量绳的尺度分布

根据通过最小二乘法拟合估算的通量绳直径, 可以得出这些通量绳的平均直径为 0.14 AU, 其中尺度最小的事件持续时间只有 27 min。图 2 和 3 给出了这些通量绳直径的分布图。图 2 的横坐标是通量绳的直径, 纵坐标是所有大于这个直径的通量绳数目, 这样可以很容易地看出磁通量绳在尺度分布上是否存在间断; 图 3 是这些通量绳个数分布随尺度的变化。由图 2 可以很清楚看出这 144 个通量绳连续地分布在 0.004 AU 到 0.6 AU 之间。由此可知, 在行星际空间不只是存在两种尺度截然不同的磁通量绳, 而是存在尺度由小到大连续分布的磁通量绳且其物理特性随着尺度增加发生缓慢变化。由图 3 还可以看出, 通量绳的发生率随着直径的增加而降低, 这表明小的事件更容易发生。

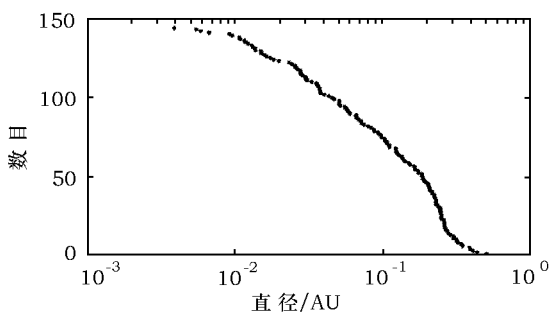


图 2 通量绳的直径分布图<sup>[10]</sup>

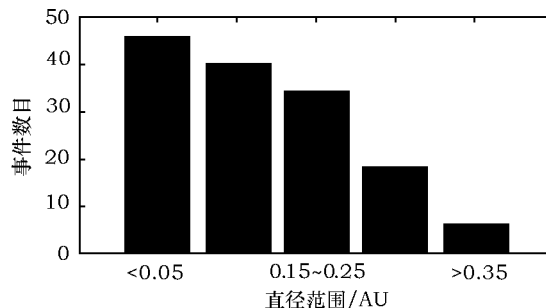


图 3 磁通量绳事件的直径分布图<sup>[10]</sup>

## 4 行星际磁通量绳的能量分布

### 4.1 单位长度的能量分布

爆发能量的多少是太阳活动的一个重要特征, 分析各种太阳活动的能量分布是研究太阳活动了解太阳活动规律的一个重要手段。如同前面提到的, 很多学者对 CME 的能量特点进行研究。另外, 太阳耀斑能量分布也是太阳物理研究的一个重要课题<sup>[12,13]</sup>。但是到目前为止, 还没有关于行星际磁通量绳能量研究的报道。而研究行星际磁通量绳能量的分布不仅对了解行星际磁通量绳本身有重要意义, 而且对于研究行星际磁通量绳和地球磁层的相互作用也十分有益。更重要的是, 如果知道了行星际磁通量绳的能量分布, 再和太阳上耀斑能量进行对比, 可以研究行星际通量绳的起源。估算整个行星际磁通量绳的能量是十分困难的, 对于大尺度的磁云, 虽然通常认为通量绳的根部仍然连接在太阳上<sup>[14,15]</sup>, 但是很难估算整个通量绳的长度。目前还不知道中、小尺度的通量绳的根部是否还连在太阳上, 更无从估算整个通量绳的

长度。但是可以估算通量绳单位尺度的能量。通量绳的能量包括磁能 ( $E_B$ )，热能 ( $E_T$ ) 和动能 ( $E_K$ ) 三部分。磁能的能量密度可以表示为

$$w_B = B^2/2\mu_0 . \quad (3)$$

其中， $\mu_0$  为真空磁导率。根据常  $\alpha$  无力场轴对称模型，利用式 (1) 和 (3) 可以将行星际通量绳单位长度的磁能表示为

$$E_b = \int_0^{R_0} w_B 2\pi R dR = \int_0^{R_0} B^2 \pi R dR / \mu_0 = \pi B_0^2 R_0^2 [J_2^2(\alpha R_0) + J_1^2(\alpha R_0)] / 2\mu_0 \quad (4)$$

因为在磁云的边界处只有环向分量，即取  $\alpha R_0 = 2.4$ ，则上式可以简化为

$$E_B = 0.228 \pi B_0^2 R_0^2 / \mu_0 . \quad (5)$$

热能密度可以表示为

$$w_T = n m_p V_{th}^2 / 2 , \quad (6)$$

其中  $n$ 、 $V_{th}$  和  $m_p$  分别为质子密度、质子热速度和质子质量。作为估算，密度和热速度取平均密度 ( $n_0$ ) 和平均热速度 ( $V_{th0}$ )，这样通量绳内单位长度的热能可以表示为

$$E_T = n_0 m_p V_{th0}^2 \pi R_0^2 / 2 . \quad (7)$$

由于通量绳是在背景太阳风中运动，所以估算其动能的时候应该减去背景太阳风的速度。在估算背景太阳风速度时主要根据以下原则：(1) 通量绳前端如果有前导激波或速度突然增加的前向压力波 (Forward Pressure Wave, 简称 FPW) 时<sup>[16]</sup>，就取激波或 FPW 之前 10 个小时的速度平均值作为背景太阳风速度。一般来说，速度和尺度越大的通量绳越容易驱动激波，但不是所有的大尺度、高速通量绳都驱动有激波。另外尺度稍小、速度稍低的通量绳仍然可能驱动激波，如在所有和激波相关的事件中，有的事件尺度 (直径 0.0508AU) 和速度 (平均速度约为 300 km/s，最大速度为 325 km/s) 都较小。(2) 对于前端没有激波和 FPW 而通量绳的速度又比前端背景太阳风速度大的事件，取通量绳事件前 1 天速度的平均值作为背景太阳风速度。对于时间间隔比较近的两个中、小尺度事件，认为其有共同的背景速度，并只估算前面事件的背景速度。(3) 对于有些事件，其平均速度小于前面太阳风的速度，就认为其动能已经完全消耗掉，不再有动能。知道了背景太阳风速度，通量绳内单位长度的动能可以用下式估算：

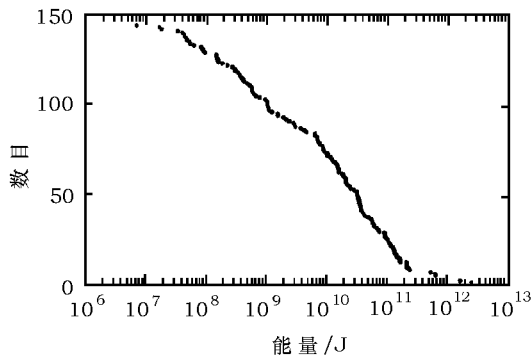
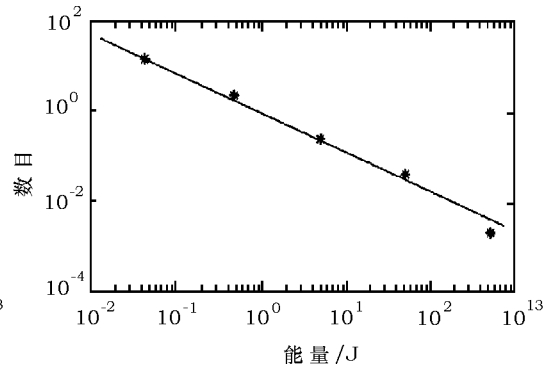
$$E_K = n_0 m_p (V_M - V_0)^2 \pi R_0^2 / 2 , \quad (8)$$

其中  $V_M$  和  $V_0$  分别为通量绳的平均速度和估算的背景太阳风速度。

利用上面对单位长度通量绳磁能、热能和动能的估算公式，通量绳单位长度的总能量为

$$E = E_B + E_T + E_K \quad (9)$$

图 4 和图 5 给出了这些通量绳单位长度的能量分布图。图 4 的横坐标是通量绳单位长度的能量，纵坐标是所有大于这个能量的通量绳数目；图 5 是通量绳的发生率 (即每  $10^7$ J 内的事件随

图 4 通量绳单位长度的能量分布图<sup>[10]</sup>图 5 通量绳的发生率 (即每  $10^7 J$  内的事件数) 随单位长度能量的变化<sup>[10]</sup>

数) 单位长度能量的变化。结合图 4 和图 5 可以看出, 通量绳能量也呈连续分布, 且事件的发生率随能量的分布是一个很好的幂率谱, 其谱指数为  $\alpha = 0.87$ , 即

$$N(E) \approx 1.191E^{-0.87} \quad (10)$$

和耀斑发生率随能量的分布相似 (见式 (13)), 只是谱指数相对较小。

#### 4.2 总能量分布

前面已经提到, 虽然通常认为磁云的两端仍然连接在太阳上, 但是其整体结构很难确定, 则很难正确地估算磁云的长度。如果简单地假设所有尺度的行星际磁通量绳的两端都连接在太阳上, 当它们到达地球时总长度  $L_0$  的范围为  $2 \text{ AU} < L_0 < \pi \text{ AU}$ 。这样行星际磁通量绳的总能量就可以通过下式估算:

$$E_{\text{tot}} = (E_B + E_T + E_K)L_0 \quad (11)$$

假设所有行星际磁通量绳的有效长度  $L_0$  等于  $2.5 \text{ AU}$ , Wu 等人<sup>[17]</sup> 计算了上述 144 个行星际磁通量绳的总能量, 这些磁通量绳的总能量分布在  $10^{19} \sim 10^{24} \text{ J}$  之间。图 6 和图 7 分

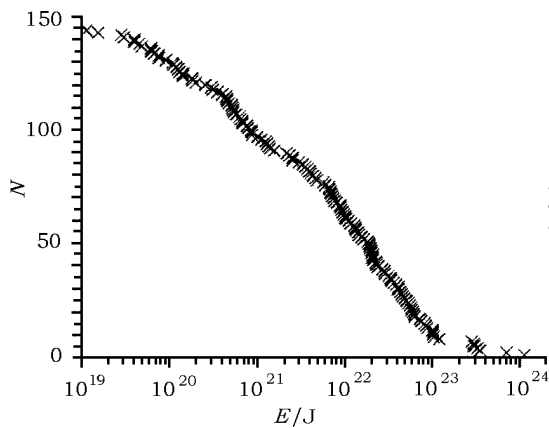
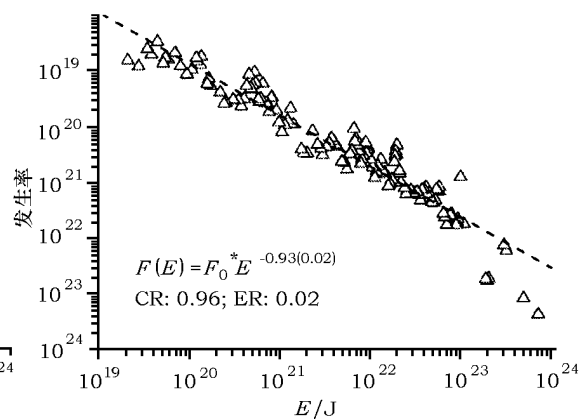
图 6 磁通量绳的总能量分布图<sup>[17]</sup>

图 7 磁通量绳单位能量间隔内的发生率

别给出了磁通量绳的总能量分布图和磁通量绳的发生率随总能量的变化图。从图 7 可以看出, 磁通量绳的发生率随总能量的分布是一个很好的幂率谱, 其谱指数为  $\alpha = 0.93$ , 即

$$F(E_{\text{tot}}) = F_0 E_{\text{tot}}^{-0.93} . \quad (12)$$

## 5 行星际磁通量绳的起源以及和日冕物质抛射关系

众所周知, 磁云作为一种大尺度的通量绳结构是日冕物质抛射 (CME) 在行星际空间的对应物, 是行星际日冕物质抛射的一个子集, 其直接起源于太阳表面的爆发。根据 3.2 节对几个小、中、大尺度通量绳的分析, 可以知道尺度相近的通量绳具有相似的特性, 而所有通量绳又呈现连续分布。这样尺度接近于磁云的中等通量绳和磁云很可能是同一类现象, 尺度稍大一点的中等尺度通量绳与稍小一点的中等尺度通量绳也可能是同一类现象, 同样小通量绳和磁云也很可能是同一类现象。另外, 磁场重联是大家普遍接受的 CME 和耀斑等太阳活动爆发的触发生源, 太阳活动爆发也经常同时产生 CME 和耀斑, 通常称这样 CME 为和太阳耀斑相关的 CME<sup>[18-20]</sup>。观测和理论都表明太阳耀斑爆发能量约在  $10^{17}\text{J}$ (微耀斑) 和  $10^{25}\text{J}$ (大耀斑) 之间, 而且发生率和能量之间也服从幂率谱分布<sup>[12,13]</sup>:

$$N(E) = AE^{-\alpha} \quad (1.4 < \alpha < 2) . \quad (13)$$

即行星际磁通量绳和耀斑具有相同的能量分布特征, 只是行星际磁通量绳的谱指数相对较小。必须注意太阳耀斑能量与磁通量绳的能量之间计算是不同的: 通常的耀斑能量统计中, 一般以爆发的峰值流量作为耀斑能量的量度。测量的软 X 射线 / 硬 X 射线峰值流量, 主要来源于热电子或非热电子的韧致辐射。以电子辐射的流量作为耀斑释放的能量的量度, 隐含了一个前提: 电子辐射的流量与耀斑释放的能量成正比。我们假设其与日冕中的磁绳结构的能量有近似的分布, 这就意味着负幂率谱可能是太阳活动爆发的一个基本特征, 尤其是 CME 也可能有和耀斑类似的负幂率谱。这就意味着在日冕活动中也产生很多小的 CME, 只是它们的强度太弱, 受目前观测技术的限制而没有被日冕仪观测到 (SOHO/LASCO 的 3 个日冕仪 C1、C2、C3 的观测亮度范围分别为  $2.0 \times 10^{-8} \sim 2.0 \times 10^{-5} B_{\odot}$ 、 $5.0 \times 10^{-10} B_{\odot} \sim 2.0 \times 10^{-7} B_{\odot}$ 、 $1.0 \times 10^{-11} \sim 3.0 \times 10^{-9} B_{\odot}$ <sup>[21]</sup>,  $B_{\odot}$  是太阳的光度)。和通常的 CME 和耀斑相关一样, 这些小尺度的 CME 很可能和太阳上的小耀斑 (或微耀斑) 相关; 和磁云对应于通常的 CME 一样, 中、小尺度的通量绳对应相对较小的 CME (micro-CME、nano-CME)。所以行星际磁通量绳和耀斑有类似的能量谱。磁通量绳能量的幂率谱指数比耀斑能量的谱指数小, 可能是因为小的 CME (即和微耀斑或小耀斑相关的 CME) 在日地空间的传播过程中比较容易被破坏掉, 小尺度的通量绳在确认过程中也容易被漏掉; 小尺度的通量绳还容易被卫星错过, 大尺度的磁云一般不容易被错过, 而对耀斑的观测则不存在这样的问题。

基于上面对行星际磁通量绳尺度和相关特性的分析, 以及行星际磁通量绳和耀斑的能量都呈现幂律谱的观测事实, 我们提出一个可能猜想: 所有的小、中、大尺度通量绳都直接起源于太阳上的爆发, 和磁云对应于通常的 CME 一样, 中、小尺度的通量绳对应相对较小的 CME (如 micro-CME、nano-CME)。其实, 有很多证据表明在太阳上存在可能对应于中、小尺



度通量绳的小爆发事件, 如 X 射线观测到的亮 S 形结构<sup>[22]</sup>、X 射线等离子体团等<sup>[23-27]</sup>。Mandrini 等人<sup>[28,29]</sup> 不久前的工作已经发现一些中间尺度行星际通量绳起源于太阳上小爆发活动的证据。他们发现在 1998 年 5 月 11 日 0750 UT 左右在日面中心出现一个小的软 X 射线亮点, 接着发展成 S 形冕环结构并消失, 同时出现远紫外观测变暗。通过分析这个日面上的 S 形结构和 1998 年 5 月 15 日的中等通量绳事件, 发现时间的延迟、S 形冕环相对于黄道面的位置与通量绳的位置、环的螺旋性和通量绳螺旋性等都能很好地对应。所以他们认为这个小的 S 形环是 1998 年 5 月 15 日通量绳事件的源。

## 6 讨论与展望

最后必须指出, 虽然上述工作取得了一定进展, 但是很难绝对地排除中小尺度行星磁通量绳起源于行星际空间磁场重联的可能。还有可能是部分的中小尺度行星际磁通量绳起源于太阳上的活动爆发, 而另外一部分起源于行星际磁场重联。要准确地确定中小尺度行星际磁通量绳的源, 还需要开展进一步的工作以提供直接的观测证据。随着对太阳观测卫星精度的提高, 可以寻找更多中小尺度行星际磁通量绳起源于太阳爆发的观测证据, 甚至直接证明其起源发展的证据; 也可以利用更多更精确的同时、多点的空间卫星观测资料, 寻找中小尺度行星际磁通量绳起源于行星际空间磁场重联的可信证据。

**致谢** 感谢 NASA/GSFC 提供 Wind 卫星的关键数据。

### 参考文献:

- [1] Marubashi K. *Adv. Spa. Res.*, 1986, 6: 335
- [2] Burlaga L F. *JGR*, 1988, 93: 7217
- [3] Richardson I G, Cane H V. *GRL*, 2004, 31: L18804
- [4] Lepping R P, Burlaga L F, Jones J A. *JGR*, 1990, 95: 11957
- [5] Moldwin M B, Ford S, Lepping R, et al. *GRL*, 2000, 27: 57
- [6] Burlaga L F, Sittler E, Mariani F, et al. *JGR*, 1981, 86: 6673
- [7] 汪毓明, 叶品中, 王水. *天文学进展*, 2003, 21: 301
- [8] Moldwin M B, Ford S, Lepping R, et al. *JGR*, 1995, 100: 19903
- [9] Crooker N U, Burton M E, Phillips J L, et al. *JGR*, 1996, 101: 2467
- [10] Feng, H Q, Wu D J, Chao J K. *JGR*, 2007, 112: A02102
- [11] Lundquist S. *Ark. Fys.*, 1950, 2: 361
- [12] Hudson H S, *Sol. Phys.*, 1991, 133: 357
- [13] Craig I J D, *Sol. Phys.*, 2001, 202: 109
- [14] Kahler S W, Reames D V. *JGR*, 1991, 96: 9419
- [15] Cane H V, Richardson I G, *JGR*, 2003, 108: 1156
- [16] Burlaga L F, Skong R M, Smith C W, et al. *JGR*, 2001, 106: 20957
- [17] Wu D J, Feng H Q, Chao J K. *A&A*, 2008, 480: L9
- [18] Kahler S W. *A&A*, 1992, 30: 113
- [19] Andrews M D, Howard R A. *Space. Sci. Rev.*, 2001, 95: 147
- [20] Moon Y J, Choe G S, Wang H. *ApJ*, 2002, 581: 694
- [21] Brueckne G E, Howard R A, Koomen M J, et al. *Sol. Phys.*, 1995, 162: 357

- [22] Sterling A C, Hudson H S, APJ, 1997, 491: L55
- [23] Tsuneta S. in IAU Colloq. 141, Zirin H, Ai G, Wang H, eds. ASP Conf. Proc. 1993: 46239
- [24] Shibata K, Masuda S, Shimojo M. APJ, 1995, 451: L83
- [25] Ohya M, Shibata K. ApJ, 1998, 499: 934
- [26] Wang Y M, Sheeley N R, Walters J H, et al. APJ, 1998, 498: L165
- [27] Einaudi G, Chibbaro S, Dahlburg R B, et al. APJ, 2001, 547: 1167
- [28] Mandrini C H, Pohjolainen S, Dasso S. A&A, 2005, 434: 725
- [29] Mandrini C H, Pohjolainen S, Dasso S, et al. Adv. Space Sci., 2005, 36: 1579

## Studies on the Sizes and Energies of Interplanetary Magnetic Flux Ropes

FENG Heng-qiang<sup>1,2</sup>, HAN Yun-xia<sup>1</sup>, WU De-jin<sup>2</sup>, ZHAO Ji-kun<sup>3</sup>

*(1. Department of Physics, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China; 2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Institute of Space Science, NCU, Taiwan 32001, China)*

**Abstract:** Interplanetary magnetic flux ropes are a kind of important magnetic structure in solar wind. Previously, some scientists believed that there exists two kinds of interplanetary magnetic flux ropes. One is magnetic cloud, and the other is small magnetic flux rope identified by Moldwen et al(2000). Both kinds of magnetic flux ropes approximately have the static, constant-alpha force-free, cylindrically symmetric configuration. But the small-scale magnetic flux ropes have no famous expansion and lower proton temperature behaviors. Moldwen et al(2000) suggested that the two samples are from two different source regions: magnetic clouds from reconnection in the solar corona, and these small-scale flux ropes from reconnection across the heliospheric current sheet (HCS). In observations from 1995 to 2001 from the Wind spacecraft, 144 interplanetary magnetic flux ropes were identified in the solar wind around 1 AU. Their durations vary from tens of minutes to tens of hours. These magnetic flux ropes include many small- and intermediate-sized structures and display a continuous distribution in size. Energies of these flux ropes are estimated and it is found that the distribution of their energies is a good power law spectrum. The possible relationship between them and solar eruptions is discussed. It is suggested that like interplanetary magnetic clouds are interplanetary coronal mass ejections, the small- and intermediate-sized interplanetary magnetic flux ropes are the interplanetary manifestations of small coronal mass ejections produced in small solar eruptions. However, these small coronal mass ejections are too weak to appear clearly in the coronagraph observations as an ordinary coronal mass ejection.

**Key words:** solar physics; interplanetary magnetic flux ropes; interplanetary magnetic field