《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS



英文刊文章推介

小尺度行星际磁通量绳

冯恒强1,2*, 赵国清1,2, 王杰敏1,2

1. 洛阳师范学院空间物理研究所, 洛阳 471934;

2. 河南省电磁变换与探测重点实验室, 洛阳 471934

* E-mail: fenghq9921@163.com doi: 10.1360/SST-2020-0014

行星际磁通量绳是太阳风中一种重要的磁结构,在地球附近经常被卫星观测到,其直径分布约为0.0039~0.6266 AU,其时间尺度分布在几十分钟到几十小时之间。在行星际磁通量绳中,大尺度的磁云是行星际日冕物质抛射(interplanetary coronal mass ejection, ICME)的子集,其直径约为0.2~0.6 AU,持续时间通常在12 h以上。直径小于磁云的磁通量绳称为小尺度磁通量绳,其时间尺度通常小于12 h.其实磁云和小尺度磁通量绳并没有明显的尺度界限,行星际磁通量绳的尺度呈现连续分布。由于磁通量绳的螺旋磁结构能够持续稳定地提供南向磁场,当其和地球磁层作用时,大尺度磁通量绳(磁云)往往能够引起较强的地磁暴,而小尺度磁通量绳则对磁层亚暴的触发十分有效。所以研究行星际磁通量绳对实现空间天气预报具有十分重要的作用。

小尺度行星际磁通量绳由Moldwin等人^[1]最先发现报道,它们的持续时间为几十分钟.和磁云一样,这几个Moldwin报道的小尺度磁通量绳可以用轴对称无力场模型拟合.但是这些小尺度磁通量绳和磁云相比,除了时间尺度相差很大外,内部没有出现磁云内常见的低温现象,也没有观测到明显的膨胀现象.基于这些差别,加上没有持续时间为几个小时的所谓中间尺度磁通量绳的报道,Moldwin等人建议这些小尺度行星际磁通量绳和磁云不是同一种现象,它们具有不同的源:相对于磁云起源于太阳日冕大气,小尺度磁通

量绳起源于行星际空间的日球层电流片处的磁场重联. 如果小尺度磁通量绳和磁云是同一类现象, 那么所有行星际磁通量绳的尺度分布应该是连续的. 而Modwin等人给出的小尺度磁通量绳起源于日球层电流片附近推断仅是日球层电流片的厚度和小尺度事件的直径相当. 2006年, Feng等人^[2]系统地调研了1995~2001年间Wind卫星探测到的行星际磁通量绳, 发现144个磁通量绳的时间尺度从几十分钟到几十小时呈现连续分布, 且其观测特性随着尺度的增加缓慢变化. 于是Feng等人建议所有的行星际磁通量绳都起源于太阳,小尺度事件是太阳上小日冕物质抛射(coronal massejection, CME)在行星际空间的对应物. 随后, 大量研究人员开始关注小尺度磁通量绳, 对其起源, 观测特性和地磁效应开展研究.

随着对小尺度行星际磁通量绳深入研究,研究人员证实了部分小尺度事件确实起源于太阳,还逐渐发现小尺度事件和磁云由很多相似特征,也有一些不同特征.相似特征主要有: (1) 两者的年发生率虽然都不随太阳活动周发生变化,但是两者的年发生率却十分相似,尤其是都在1999年明显较低; (2) 两者的速度都和典型的慢太阳风相当,只有个别事件的速度和高速太阳风相当; (3) 两者的轴向分布十分相似; (4) 两者都具有边界层结构; (5) 两者都具有反常的重离子特性,如He和O⁷⁺丰度的升高等; (6) 多数磁云和小尺度磁通量绳内部都存在双向超热电子束流.不同特征有:

全文英文见: Feng H Q, Zhao G Q, Wang J M. Small interplanetary magnetic flux rope. Sci China Tech Sci, 2020, 63: 183–194, https://doi.org/10.1007/s11431-018-9481-1

© 2020 《中国科学》杂志社 www.scichina.com

(1) 相对于磁云, 小尺度事件磁场强度相对较低, 没有 明显的膨胀现象; (2) 小尺度事件内部质子温度和Beta 值相对于背景太阳风没有明显降低; (3) 小磁通量绳的 尺度分布呈幂律谱, 而磁云的尺度分布呈高斯分布. 这 些相同的观测特性可能表明它们具有相同的源. 不同 的观测特性也可能表明部分小尺度事件起源于行星际 空间. 这些不同的观测特性也可能是由尺度效应造成 的, 如观测表明磁通量绳的磁场强度和其尺度成正比, 那么小尺度事件的磁场强度必然较低、而较低的磁场 造成其内外压力差较小, 在传播过程中很容易达到压 力平衡,不再膨胀. 其实磁云内部的低温、低密度和 低Beta值也是磁云在传播过程中快速地绝热膨胀造成 的. 那么小尺度事件没有明显膨胀将会造成温度和密 度不再下降. 另外, 多数小尺度磁通量绳事件同样具 有边界层结构、说明这些小尺度磁通量绳被卫星观测 到之前已经传播了一段时间.

行星际磁通量绳的传播效应能够改变其部分观测 特征, 但是不会改变其内部的重离子成分. 因为当太阳 风离开日冕后会快速膨胀、使离子和电子的碰撞时间 尺度变长, 当平衡时间大于传播时间时, 可以认为各 种粒子所占的比例不变(冻结)。 所以磁云内部的反常 高的铁平均电离度(>12.00)和反常高的 $O^{7+}/O^{6+}(>1.00)$ 被看作是CME在太阳上爆发时和其相关的耀斑加热 所致. 如果小尺度行星际磁通量绳有与磁云相同的重 离子观测特征,则能表明这些小尺度事件一定来源于 太阳, 因为在行星际空间重离子成分不可能改变, 通 过分析ACE卫星观测到的小尺度磁通量绳、发现小磁 通量绳内出现反常高的铁平均电离度和O7+/O6+比的 几率和ICME内的基本一致,这给出了小尺度磁通量绳 起源于太阳的可靠证据. 至少该结果表明部分小尺度 磁通量绳一定起源于太阳, 并且这些小尺度磁通量绳 对应的CME和耀斑爆发相关. 空间卫星还探测到在 106个小尺度行星际磁通量绳中79个事件内部存在双 向超热电子束流, 这表明这部分小尺度磁通量绳不但 起源于太阳,而且其两端仍然和太阳磁场相连.那么不含双向超热电子流束的事件是否也起源于太阳?它们是在传播过程中由于和背景磁场发生重联断开了还是起源于行星际空间有待于深入研究.

除了在行星际空间找到了可靠的小尺度磁通量绳起源于太阳证据外,研究人员还利用STEREO卫星跟踪观测了几个CME,发现它们在星际空间确实呈现小尺度磁通量绳结构^[3]. 而且发现个别小尺度行星际磁通量绳在太阳附近竟然是正常尺度的CME, 而非小CME. 另外, 虽然在小尺度行星际磁通量绳内观测到了反常高的铁平均电离度和O⁷⁺/O⁶⁺比,但是这几个小尺度磁通量绳对应的CME都没有观测到和耀斑爆发相关.

由于小尺度磁通量绳具有特殊的磁结构,它对亚 暴的触发可能十分有效.统计结果表明69%的小尺度 磁通量绳触发了亚暴.它们主要通过内部持续南向行 星际磁场的突变(南转北向)和突然增强的动压触发的.

近十几年来, 对小尺度行星际磁通量绳的研究已 经取得了相当大的进展,目前对其行星际观测特征、 磁结构、演化和对地磁活动的触发等有了较全面的了 解. 然而, 我们还不完全清楚小尺度磁通量绳的起源以 及和磁云的关系. 虽然小尺度磁通量绳和磁云具有许 多相似的特性, 但我们只能确定部分小尺度磁通量绳 起源于太阳,是小CME在行星际空间的对应物. 虽然 小尺度磁通量绳和磁云有一些不同特性, 但是可以用 它们的尺度效应来解释. 尽管这样, 我们还是不能排 除某些小尺度磁通量绳具有星际起源的可能性. 因此, 未来关于小尺度磁通量绳研究的主要目的是确定它们 是否有两个不同的源:一部分事件起源于太阳日冕大 气,另一部分事件是在星际空间的日球层电流片附近 形成的. 为了达到上述目标, 可以利用数值模拟研究 小尺度磁通量绳在日球层电流片处的形成机制, 并寻 找相应的观测证据;或利用帕克太阳探测器(Parker Solar Probe)跟踪或探测到离太阳更近的小尺度磁通 量绳, 弄清楚它们的形成机制.

参考文献-

- 1 Moldwin M B, Ford S, Lepping R, et al. Small-scale magnetic flux ropes in the solar wind. Geophys Res Lett, 2000, 27: 57-60
- 2 Feng H Q, Wu D J, Chao J K. Size and energy distributions of interplanetary magnetic flux ropes. J Geophys Res, 2007, 112: A02102
- 3 Rouillard A P, Sheeley N R, Cooper T J, et al. The solar origin of small interplanetary transients. Astrophys J, 2011, 734: 7