

行星际空间多重磁云的研究与展望

汪毓明

(中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026)

摘要:多重磁云是行星际空间中一类特殊的复杂抛射结构.它们是由于日冕物质抛射(CME)相互追赶、相互作用形成的,具有显著的地球空间环境效应.自从我们于2002年发现并确认了第一个多重磁云事件后,国际上对此开展了大量的研究.本文简要回顾多重磁云的相关研究工作和取得的成果,并分析研究过程中遇到的问题和瓶颈,最后对行星际动力学以及空间科学的发展进行展望.

关键词:行星际物理;日冕物质抛射;空间天气

中图分类号: **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.05.00

引用格式: Wang Yuming. Multiple magnetic clouds in interplanetary space: A review and perspective[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014,44(5):100-105.

汪毓明. 行星际空间多重磁云的研究与展望[J]. 中国科学技术大学学报, 2014,44(5):100-105.

Multiple magnetic clouds in interplanetary space: A review and perspective

WANG Yuming

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Multiple magnetic clouds are a particular complex structure in interplanetary space. They are formed due to the chase and interaction between successive coronal mass ejections (CME), and though be significantly geoeffective. The first reported multiple-magnetic-cloud structure was observed in 2000 November. After then, lots of relevant research has been carried out. This talk will give a brief review and perspective on the multiple magnetic clouds, in which following issues will be addressed. ① What is the magnetic cloud? ② What is the multiple-magnetic-cloud structure? ③ Why do we study the multiple-magnetic-cloud structure? ④ What is the challenge?

Key words: interplanetary physics; coronal mass ejection; space weather

收稿日期:2013-11-18; **修回日期:**2013-12-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41131065),国家重点基础研究发展(973)计划(2011CB811403)资助.

作者简介:汪毓明,教授,国家杰出青年科学基金获得者.现任中国科学技术大学地球和空间科学学院副院长、《中国地球物理学报》副主编.长期从事日冕与行星际动力学研究,在日冕物质抛射(CME)的形成、传播及其空间天气效应方面取得了众多成果.至今发表SCI论文50多篇,其中关于CME相互作用以及多重磁云方面的工作,分别以第一作者或通讯作者的身份在国际顶级期刊Nature Physics, Geophysical Research Letters, Astronomy and Astrophysics上发表封面文章各1篇.曾获得中国地球物理学会傅承义青年科技奖、第十二届中国青年科技奖、首届陈嘉庚青年科学奖等奖项和荣誉. E-mail: ymwang@ustc.edu.cn

0 引言

磁云 (magnetic cloud, MC) 是行星际空间中的一类特殊的磁化等离子体结构. 它往往速度较快、磁场较强, 对地球空间环境具有显著的影响, 是强地磁暴最重要的行星际驱动源^[1,2], 因而备受人们的关注. 同时, 磁云是太阳大气中最猛烈的爆发活动——日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 在行星际空间中的产物. 它的热力学、动力学以及磁场特性在很大程度上继承于 CME, 磁云的研究对我们深入理解 CME 的爆发和传播过程具有重要的意义.

相对于背景太阳风, 磁云具有特殊的观测特征: 增强的磁场、明显且平滑的磁场方向旋转变化的质子温度和 β 值、持续下降的等离子体速度、双向电子流等. 第一个磁云事件是由 Burlaga 等^[3] 于 1978 年发现的. 在该工作中, 他们分析了 1978 年 1 月 5~8 日期间 5 颗飞船的行星际观测数据. 这 5 颗飞船都在黄道面内, 分别为处在地球附近的 IMP8 和 Helio 2, 处在地球轨道附近但距地球三十多度的 Helio 1, 以及在 2 AU 处距地球三十度左右的 Voyager 1 和 2 (如图 1 所示).

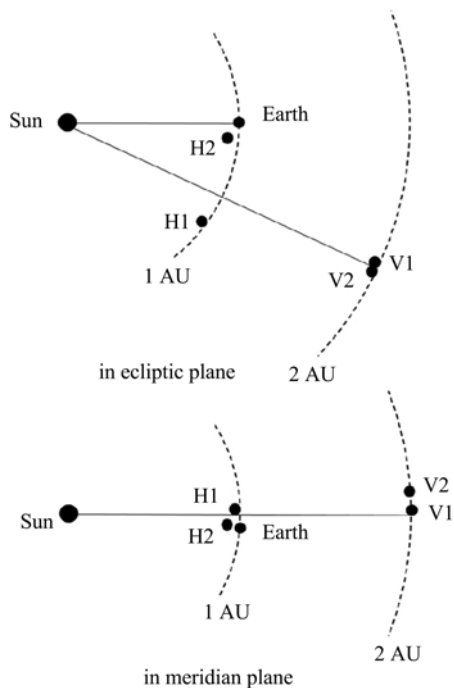
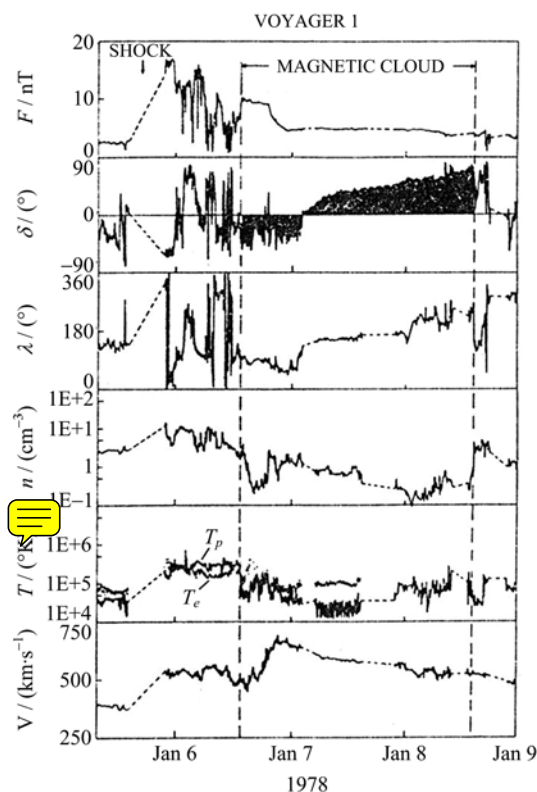


图 1 1978 年 1 月上旬 Helio 1 和 2 以及 Voyager 1 和 2 相对太阳和地球的位置, IMP8 卫星就在地球位置处^[3]

Fig. 1 Schematic plot shows the positions of Helio 1 and 2 and Voyager 1 and 2 relative to the Sun and Earth. The satellite IMP8 was near the Earth^[3]

综合 5 颗飞船的观测数据后, Burlaga 等发现它们都记录到了一段特殊的数据. 在这段数据中, 行星际磁场的强度增强、振荡明显减弱, 太阳风速度持续下降, 质子温度形成低槽, 如图 2 所示的 Voyager 1 记录到的观测数据. 这些观测表明, 这期间飞船进入了一个特殊的区域, 在这区域中磁场和等离子体具有不同于背景太阳风的特性. 这一区域即被称为磁云.



From the top to bottom, the panels show the magnetic field strength, elevation and azimuthal angles of magnetic field vector, proton number density, temperature and solar wind speed

图 2 Voyager 1 飞船记录到的磁云结构^[3]

Fig. 2 Magnetic cloud detected by Voyager 1 spacecraft^[3]

进一步的统计分析表明, 磁云是个不断膨胀的大尺度的等离子体结构, 它的膨胀速度大约是 0.5 倍的局地阿尔芬速度, 它在 1 AU 处的尺度大概是 0.28 AU^[4-5]. 因此任何一点处的观测, 都只能得到磁云非常有限的局部信息. 从单点探测数据反演出准确、完整的磁云图像, 是人们一直努力的方向之一.

利用最小方差分析法, 人们发现磁场方向的旋转变实际上表明, 从局地来看磁云很可能是携带着螺旋磁场的磁通量管结构 (如图 3 所示)^[3]. 基于

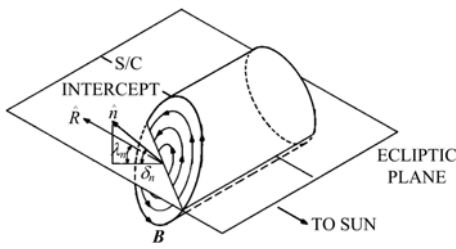
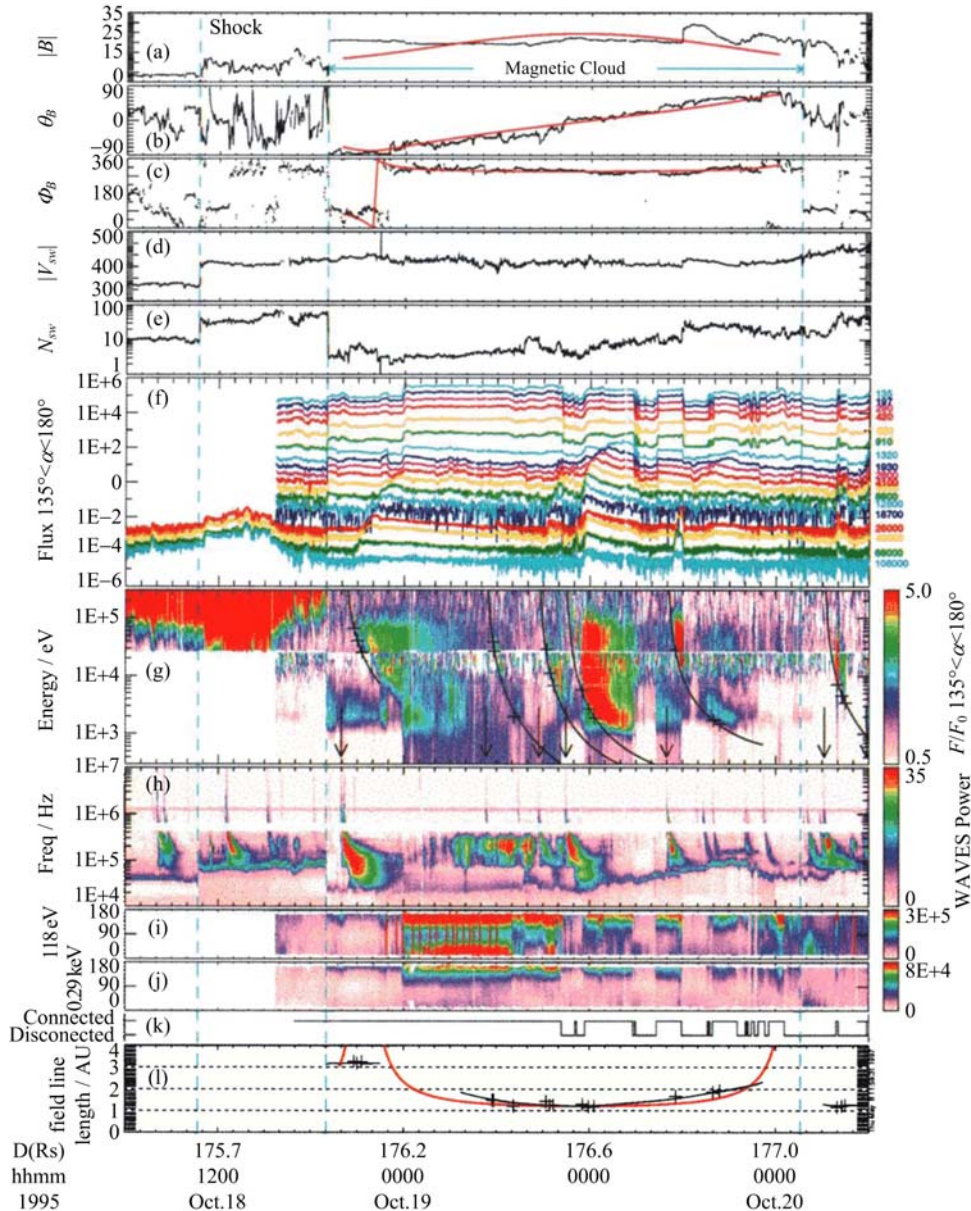


图 3 磁通量管结构示意图^[3]

Fig. 3 Schematic plot of a magnetic flux rope^[3]

这一发现,人们将磁云简化为直的轴对称的磁通量管,并发展出很多方法来反演观测数据,如柱坐标下的线性无力场模型^[5-6]和二维 GS 模型^[7]等。

磁云的全局图像是通过研究超热电子流的投掷角分布获得的.图 4 是 Larson 等^[8]分析的 1995 年 10 月 18~20 日期间的磁云事件.图 4(a),(b)表明这是一个非常典型的磁云结构,符合磁云的所有观测特征.对诊断磁云全局结构最为关键的是图 4(i).



From the top to the bottom, the panels show (a) the magnetic field strength, (b) and (c) the elevation and azimuthal angles of magnetic field vector, (d) solar wind speed, (e) number density, (f) and (g) the flux and energy spectrum of electrons, (h) radio dynamic spectrum, (i) and (j) pitch angle of suprathermal electrons, (k) connectivity and (l) the length of magnetic field lines

图 4 1995 年 10 月 18~20 日期间的行星际观测局地数据^[8]

Fig. 4 In-situ observations at 1 AU during October 18~20, 1995^[8]

我们可以发现超热电子的运动方向主要集中在平行或反平行于磁场的方向,而这些超热电子流都来自于太阳,因此人们认为磁云并非是一个直的管子,而是两个足点扎根在太阳大气中的弯曲的磁通量绳(如图 5 所示).

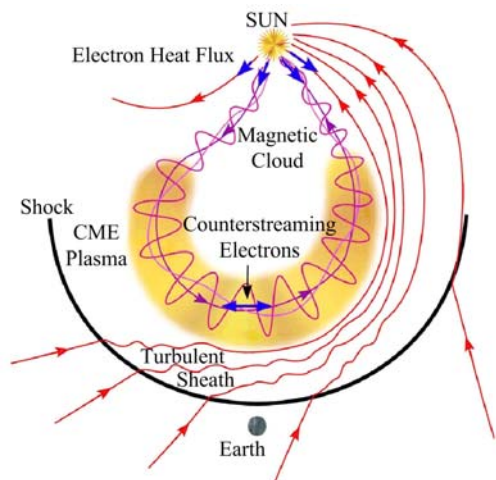


图 5 磁云全局结构示意图^[9]

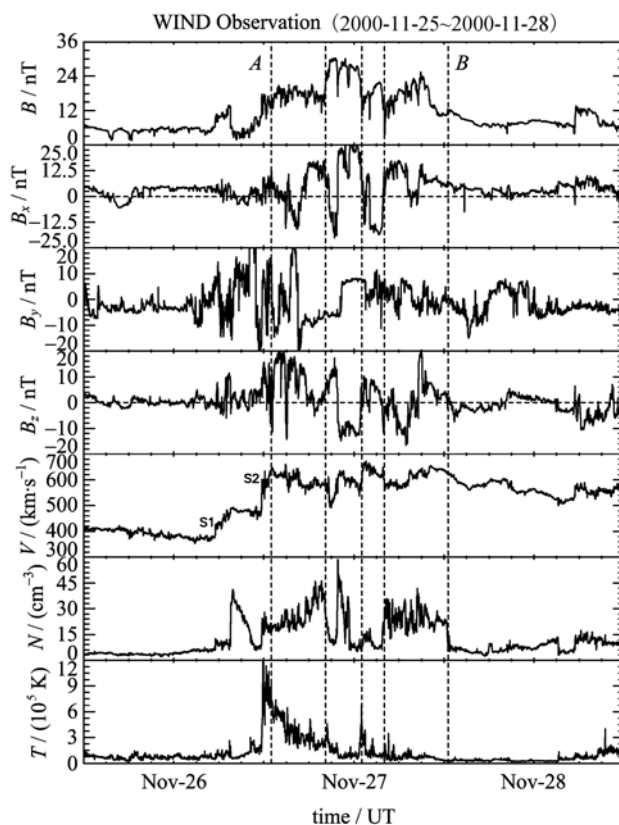
Fig. 5 A global picture of a magnetic cloud^[9]

磁云对地球空间环境的影响主要是通过冲击地球磁层,并与磁层发生磁场重联形成的,表现为强烈的地磁暴.持续时间长、强度大的行星际磁场南向分量(B_z)是地磁暴产生的最重要的条件^[10-12],而磁云往往携带这样的 B_z .如发生在 2003 年 11 月 20 日强度达 -422 nT 的地磁暴就是由 11 月 18 日从太阳大气中抛出的磁云结构引起的^[13],该磁暴也是第 23 太阳活动周最强的地磁暴.

磁云并不是偶发事件,从理论上来说,绝大部分 CME 抛射到行星际空间都会形成磁云.在太阳活动峰年期间,每天大约会产生 4.5 次 CME,但由于抛射方向的偏离和行星际环境的复杂,在地球附近实际观测到的磁云事件要明显少于 CME 事件^[14].即使这样,磁云在行星际空间中相互追赶、相互作用的情况经常发生,从而衍生出众多复杂的物理过程和现象.多重磁云正是磁云(或者说是 CME)相互追赶、相互作用的典型产物.

1 多重磁云的发现

第一个多重磁云事件是由 Wang 等^[15]于 2002 年通过分析地球附近 Wind 飞船观测数据发现的.图 6 展示了该工作所发现的 2000 年 11 月 26~27 日期间由 4 个磁云组成的多重磁云结构.这是一个



From the top to the bottom, the panels show the magnetic field strength, the three components of magnetic field in GSM coordinates, solar wind speed, number density and proton temperature.

The intervals of magnetic clouds are marked by four vertical dashed lines

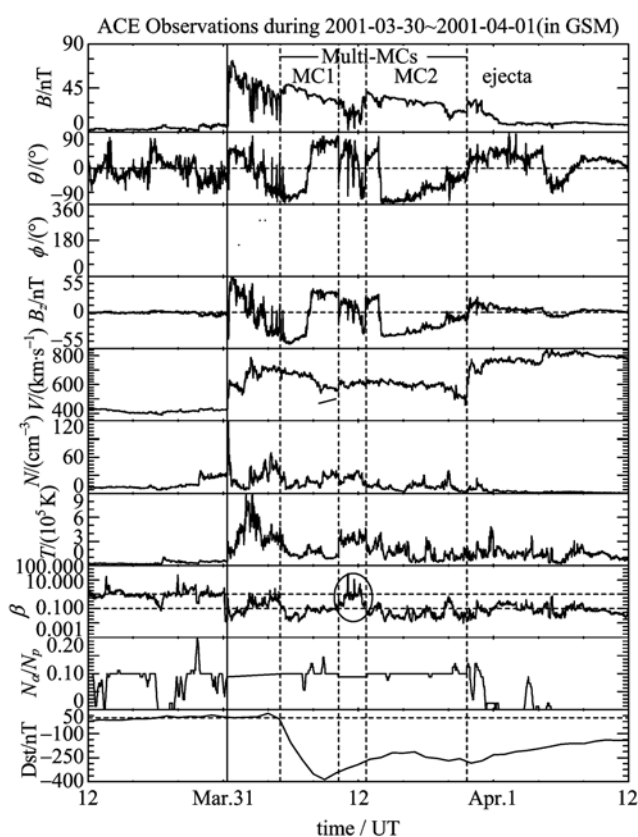
图 6 Wind 卫星观测数据^[15]

Fig. 6 In-situ observations from Wind spacecraft^[15]

非常复杂的行星际抛射结构,大致可以分辨出其中有 4 个子结构,每个子结构都具有磁云的大部分观测特征,如增强的磁场、较平滑的磁场旋转变化的、下降的太阳风速度等.虽然有些观测特征不符合磁云的标准,如较低的质子温度等,但这是由于这些结构之间相互挤压、相互作用造成的.因此我们可以初步判断这是一个多重磁云结构.但仅仅是行星际的局地观测数据并不足以确认这是一个多重磁云结构.4 个磁云必须有 4 个 CME 对应.在 2000 年 11 月 24~25 日期间太阳上爆发了一系列 CME,其中恰好有 4 个 CME 伴随了 X 级以上的耀斑^[16].无论是抛射速度还是抛射方向,都表明它们大致朝向地球运动并能追赶上对方.这进一步确证了该复杂抛射结构是多重磁云.

正如引言中提到的,磁云并不是偶发事件,同样

多重磁云也经常观测到. Wang 等^[17]发现仅在 2001 年 3~4 月期间就有 3 次多重磁云事件. 图 7 显示了其中一次较为典型的由两个磁云组成的多重磁云结构. 第一个磁云持续时间约 5 h, 第二个磁云持续了约 9 h. 相对于孤立的单个磁云事件, 这两个磁云的持续时间都很短, 且第一个磁云尾部的太阳风速度有明显的抬升. 在这两个磁云之间是它们的相互作用区, 具有与磁云明显不同的观测特征: 降低的磁场强度、显著的振荡、高温高密高 β . 这些都说明它们由于相互作用被压缩了, 而这样的压缩会增强其内部的 B_s , 从而增强其地磁效应^[18].



From the top to the bottom, the panels show the magnetic field strength, the elevation and azimuthal angles of magnetic field vector, the z -component of magnetic field in GSM coordinates, solar wind speed, number density, proton temperature, proton β , the ratio of α particles to protons and Dst index.

The vertical dashed lines mark the two magnetic clouds and the interacting region in between

图 7 ACE 卫星观测数据^[17]

Fig. 7 In-situ observations from ACE spacecraft^[17]

然而多重磁云并非是 CME 相互追赶的唯一产物. Burlaga 等^[19]于 2002 年曾报道过复杂抛射物 (complex ejecta) 的现象. 通过日冕的观测, 人们能

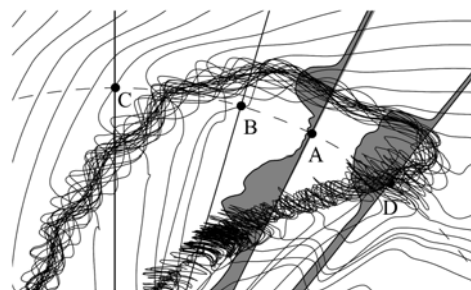
够知道该类结构是由多个 CME 相互作用形成的. 但在 1 AU 的观测中, 人们无法区分这类结构中是否有子结构, 它所携带的磁场表面上也是杂乱无章的. 什么原因造成这样的不同, 是一个非常有趣的课题. 对 CME 和磁云的相关性研究也表明, 不是所有 CME 都会在行星际空间形成磁云, 为什么会这样, 至今也还没有答案.

2 多重磁云形成与演化过程中的物理问题

多重磁云的形成与演化过程中涉及许多太阳和空间物理中的前沿科学问题. 首先, 磁云是大尺度的磁化等离子体结构, 它本身与 CME 的联系、它在传播过程中的磁场结构、热力学和动力学演化过程、它所驱动的激波及其演化等, 都是值得研究的课题. 其次, 多重磁云是如何形成的, 它们之间是如何相互作用的, 激波与磁云是如何相互作用的, 动量、能量和磁通量在它们之间是如何转化的等, 都是了解多重磁云形成和演化过程所需要回答的问题. 再次, 多重磁云的形成和演化过程为诊断当地的等离子体环境提供了许多观测信息, 为行星际动力学的研究扩展了途径.

2.1 多重磁云的本质

在观测上, 多重磁云是连续记录到两个磁通量管结构. 是否两个磁云相互追赶、相互作用是多重磁云的唯一解释? 这是一个值得探讨的问题. 从全局来看, 磁云是一个弯曲的磁通量绳 (如图 5), 这就有可能使得同一个磁云被先后观测到两次. 这一可能性曾被 Vandas 等^[20]用数值模拟研究过. 图 8 显示的是一个示意图. 其中 A, B, C, D 分别表示 4 个假



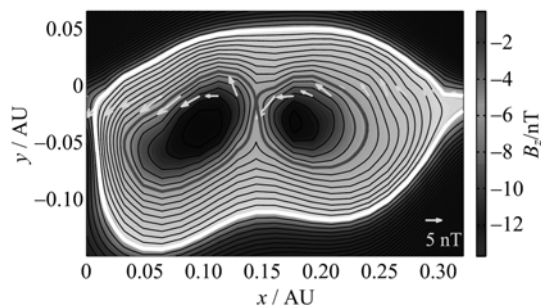
From the different observational paths, the resultant one-dimensional observations are different

图 8 三维 MHD 数值模拟给出的磁云结构以及从不同观测路径上获得的一维观测数据的曲线图^[20]

Fig. 8 Magnetic cloud structure given by a three-dimensional MHD numerical simulation^[20]

想的观测路径. 当飞船沿着路径 A 穿越磁云时, 记录到的局地磁场和等离子体数据就包含两个磁云结构. 而沿着 C 和 D 两条路径时, 都只能看到或分辨出一个磁云结构. 然而这种多重磁云的解释必须满足如下观测条件: ①先后两个子磁云的轴应大致在一个平面内; ②它们具有相同的磁螺度符号; ③有且只有一个 CME 对应. 而对于前面提到的多重磁云事件, 这些条件往往并不能满足.

另一种解释是一个磁云里可能存在多个磁通量管. 这种解释在 Hu 等^[21]发展并运用二维 GS 反演方法到磁云观测上之后, 发现是有可能的. 图 9 是其工作中的一个例子, 反演的结果发现该磁云中两个明显的磁通量管结构. 我们可以想象, 如果观测路径合适的话, 完全有可能记录到由两个相对独立的磁云结构组成的多重磁云. 同样, 这种解释也必须满足之前提到的三个条件. 为何一个磁云里会有两个或多个磁通量管结构? 这是一个进一步的问题. 磁云在行星际空间中跟背景太阳风相互作用, 会被拖拽和拉伸, 从而导致形变. 大量的模型和数值模拟也确实表明, 当磁云被拉伸到一定程度后可能会发生磁场重联, 使得磁通量管由一个分裂成两个^[22-23]. 这一过程还会在第 2.3 节中详细阐述.



The arrows denote the observed magnetic field

图 9 利用 GS 反演方法发现的具有多个磁通量管的磁云结构^[21]

Fig. 9 Magnetic cloud with multiple magnetic flux ropes revealed by two-dimensional GS reconstruction method^[21]

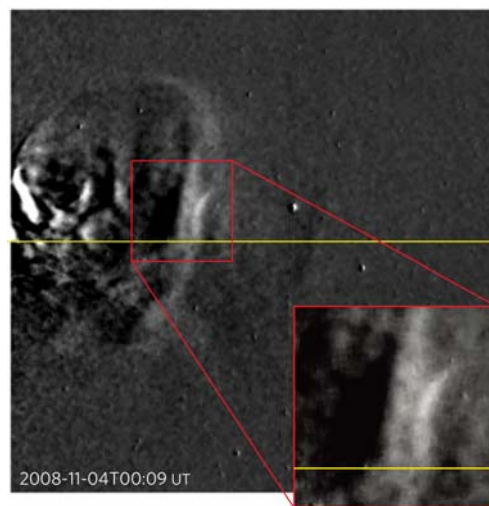
2.2 多重磁云形成过程中的动量和能量交换

假设多重磁云确实是由相继爆发的 CME 或磁云相互追赶、相互作用形成的. 那么就存在如何形成, 以及它们之间的动量和能量交换问题. 由于缺乏全面的观测, 多重磁云的形成条件和过程主要是依赖磁流体力学 (MHD) 数值模拟来进行研究的^[24-28]. 大量的研究都表明, 当两个磁云抛射方向大致相同, 后一个磁云传播速度大于前一个磁云的速度时, 就

能形成多重磁云结构. 在形成的过程中, 前一个磁云的速度增加, 后一个磁云的速度降低, 说明动量在两个磁云相互作用时, 从后一个磁云传递给前一个磁云, 同时磁云被大大地压缩, 内部磁场和压强增大.

磁云之间动量的传递在本质上反映了这两个磁化等离子体结构的碰撞特性. 磁云中的等离子体虽然是气态, 但其特性与普通气体有本质的差别. 两团气体之间的碰撞是一个相互渗透和扩散的过程, 系统总动能是下降的. 两团磁化等离子体之间的碰撞是否也是这样呢? 以前的数值模拟从磁云的形态上来分析, 它们碰撞之后就黏在一起向前运动, 因此似乎属于完全非弹性碰撞. 但事实上, 最近 Shen 等^[29]的观测研究首次表明, 它们之间的碰撞可能是超弹性的, 系统的总动能通过碰撞反而会增加.

图 10 显示的是 STEREO 飞船^[30]观测到的 2008 年 11 月期间的一次磁云 (或 CME) 碰撞事件. 中间月牙形的增亮区域就是两个磁云接触并相互挤压的部分. 通过分析这两个磁云在碰撞前和碰撞后的传播速度和方向, 他们发现前一个磁云动能增加了 68%, 后一个减少了 25%, 总系统净增加动能约 7%. 这一发现进一步被数值模拟研究所证实^[31]. 同时该数值模拟工作表明, 碰撞过程中获得的额外动能主要来自于磁云内部的磁能.



The enhanced arc-shaped region is the compression region between the two magnetic clouds.

The horizontal line marks the ecliptic plane

图 10 STEREO 飞船上的日球层成像仪观测到的一次磁云碰撞瞬间^[29]

Fig. 10 Collision of two magnetic clouds observed by HI-1 instrument onboard STEREO spacecraft^[29]

2.3 磁场重联

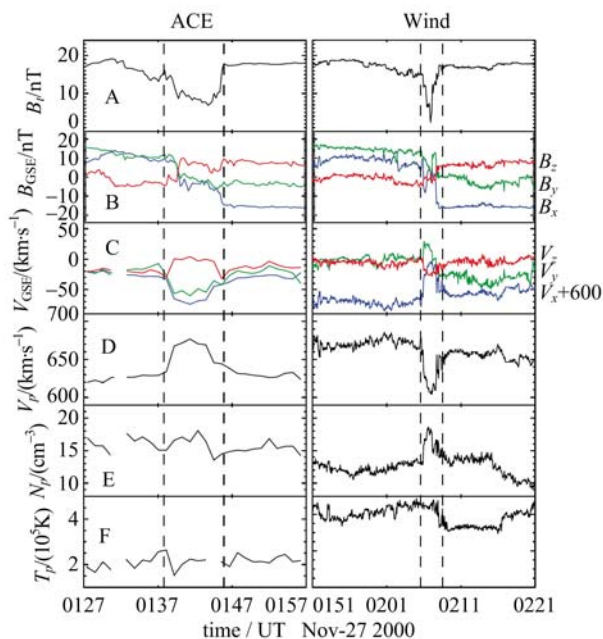
磁场重联是等离子体中的基本物理过程,它对磁云在传播过程中的磁场拓扑结构变化以及磁云之间磁通量的转移起着非常重要的作用.一般在孤立的磁云事件中,很少发现其内部存在磁场重联的现象.然而在强挤压的情况下,也就是在多重磁云事件中,人们确实发现磁云内部有可能形成电流片并发生磁场重联现象^[32].图 11(a)展示的是多重磁云事件(图 6)中的一段磁场重联区域. ACE 和 Wind 飞船记录到的磁场变化是一致的,但速度的变化刚好相反,因此它们很可能分别穿越了磁场重联区的北部和南部区域(如图 11(b)所示).

磁场重联同样对多个 CME 或磁云相互作用最终所能形成的位形起着重要的作用.最近 Lugaz 等^[33]的三维数值模拟研究表明,两个磁云之间轴向上的相对不同,对它们最终能形成的复合结构有显著影响.当两个磁云轴向大致平行、螺度符号相同,且它们的磁场与行星际背景磁场也大致平行时,虽然磁云之间容易发生磁场重联,但仍能形成较为典型

的多重磁云结构.而在其他情况下,由于其中一个磁云与行星际磁场发生磁场重联,以及磁云之间的磁场重联,它们相互作用后形成的结构就有可能难以辨认.有时它们会形成磁场方向旋转超过 180°的结构,有时第二个磁云会看上去像第一个磁云的扩展尾部^[34-35].

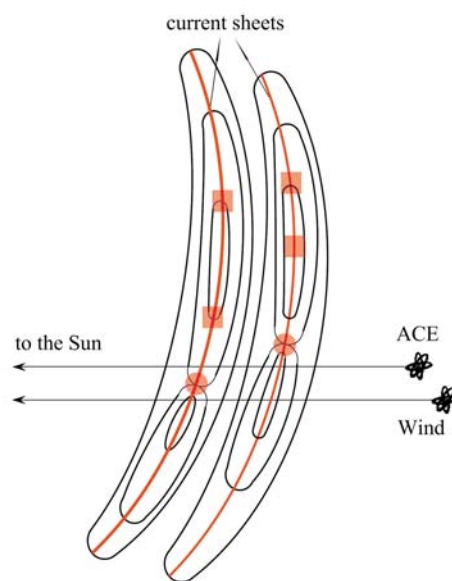
2.4 磁云内部等离子体特性的诊断

当后一个磁云速度足够快时,其前方会驱动一个激波.激波穿越并压缩前一个磁云的过程是多重磁云形成过程中的另一个有趣的现象^[36],而由此产生的特殊射电辐射观测特征可以用来诊断局部的等离子体参数. II 型射电暴是行星际激波的射电观测特征,说明激波在传播过程中能加速电子并形成射电辐射^[37].根据以前的理论和观测研究^[38],射电暴的频率就是背景的电子等离子体频率,因此射电暴可以提供激波上游的等离子体特性.当激波穿越磁云或 CME 时,射电辐射也会有相应的变化.图 12 是 Gopalswamy 等^[39]研究的一次 CME 与 CME 的相互作用过程.在这一过程中,后一 CME 驱动了激



From the top to the bottom, the panels show the magnetic field strength, the three components of magnetic field in GSE coordinates, the three components of solar wind speed, proton speed, number density and temperature.

(a)



(b)

图 11 (a) ACE 和 Wind 卫星观测到的同一个事件中的电流片和磁场重联区域

(b) 卫星、电流片以及磁场重联区域在整个多重磁云结构中位置的示意图^[32]

Fig. 11 (a) Current sheet and magnetic field reconnection region observed by both ACE and Wind spacecraft.

(b) Schematic plot of the positions of spacecraft, current sheet and magnetic field reconnection region in the multiple-magnetic-cloud structure^[32]

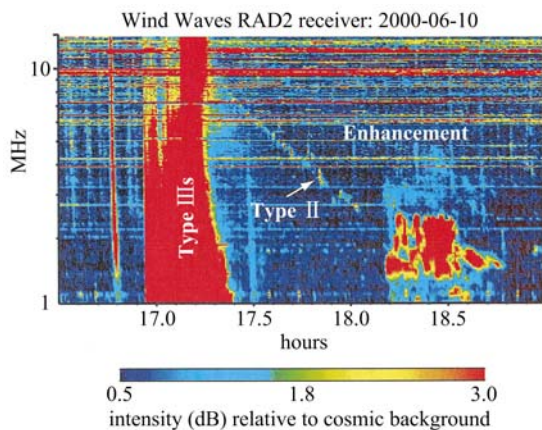


图 12 Wind 卫星上的 Waves 仪器记录到的激波-磁云相互作用时激发的射电频谱^[39]

Fig. 12 Radio burst emitted during the interaction between a shock and a magnetic cloud, which was recorded by Waves instrument on board Wind spacecraft^[39]

波并激发了 II 型射电暴(如图中 17.3~18.1 UT). 当该激波进入前一 CME 内部时,造成了持续大约 0.5 h 的宽频噪暴(18.2~18.7 UT). 简单的计算可得前一个 CME 内核的密度大约是 $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$. 类似的现象在 2001 年 1 月 20 日的 CME 相互作用事件中也被观测到^[40].

大量的研究表明,CME 的内核是日珥物质,在日冕仪中表现为高亮的密度区. 在 CME 与磁云对应关系的研究中,CME 的这一区域到底对应磁云的哪一部分一直是个谜. 在 1972~2005 年的 33 年期间仅有 10 次磁云事件观测到类似日珥的残留物. 是什么原因造成这一现象,还需要更多的观测来进一步研究.

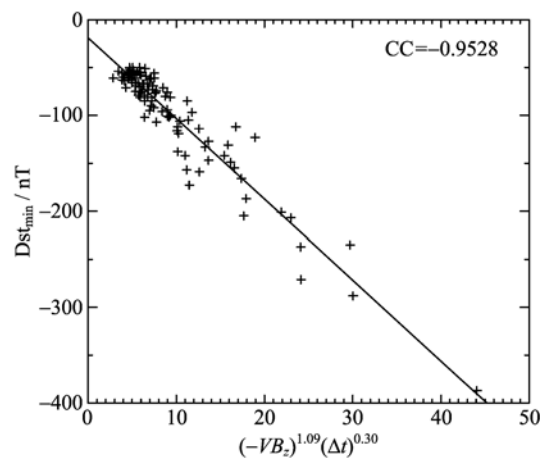
3 多重磁云的空间天气效应

磁云本身携带的 B_s 区间是地磁暴的主要扰动源,同时快速磁云前方驱动的激波不仅能产生强的 B_s ,也能加速带电粒子,是太阳高能粒子(SEP)事件的一个重要驱动源. 地磁暴和高能粒子事件是两个最为突出的空间天气效应. 多重磁云之间由于相互作用,导致强烈的压缩,从而使得这些空间天气效应被进一步放大.

3.1 超强地磁暴

当地磁指数 $Dst < -30 \text{ nT}$ 时,我们就认为产生了地磁暴, $Dst < -200 \text{ nT}$ 的地磁暴被称为特大地磁暴或超强地磁暴^[11]. 地磁暴的产生与行星际空间环境有着密切关系,其中太阳风速度 v 和行星际磁

场南向分量 B_s 最为重要^[12,41-42]. 大量的统计研究表明, Dst 值的大小与它们的乘积 vB_s 相关. 在统计研究的基础上,Wang 等^[18] 进一步分析了磁云磁场被压缩后的地磁效应变化. 图 13 是基于 105 个小于 -50 nT 的地磁暴的统计结果,发现 vB_s 与持续时间 Δt 以特定的指数形式相乘后与 Dst 的值相关性最好. 对这个相关性的进一步分析表明,当一段 B_s 区间被压缩一倍时,它所能引起的地磁暴强度能增强至原来的 1.7 倍. 多重磁云在形成和演化过程中都存在强烈的压缩,因此是潜在的超强地磁暴的扰动源,而实际的观测数据分析也确实表明了这一点.



The correlation coefficient could be as high as 95%

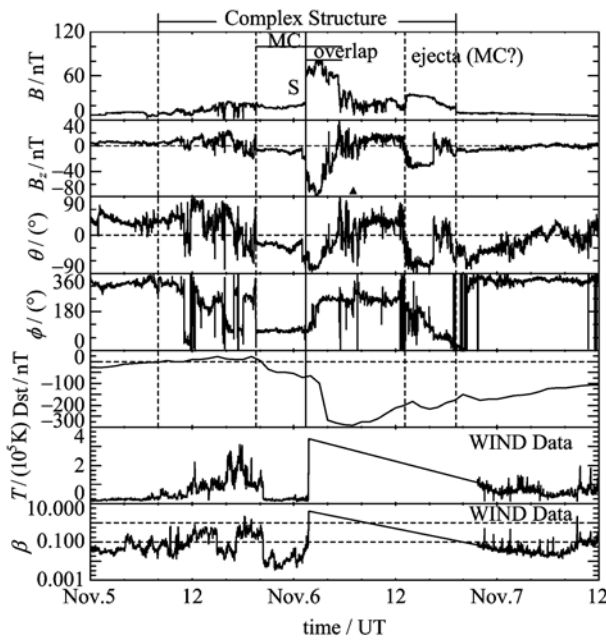
图 13 统计得到的地磁暴强度与行星际参数的散点图^[18]

Fig. 13 Correlation between the interplanetary parameters and the intensity of geomagnetic storms^[18]

在 Wang 等^[17]研究的 2001 年 3~4 月期间的 3 次多重磁云事件中,就有两次分别造成了 -387 nT 和 -271 nT 的超强地磁暴. 这些地磁暴的产生都是由于磁云高度压缩形成的强 B_s 区间的存在. 除了已经形成的多重磁云结构外,在激波穿越磁云过程中所形成的压缩区也是超强磁暴的重要扰动源. 图 14 显示的是 Wang 等^[36]发现的一次激波穿越磁云的事件. 由于激波的压缩,使得该磁云内部的 B_s 由原来的约 -10 nT 剧烈增强至 -80 nT ,并进而造成了 -292 nT 的超强地磁暴. 对大地磁暴的统计结果也表明,很大一部分超强地磁暴确实是由多重磁云或类似的复杂抛射结构所造成的^[1-2].

3.2 超强 SEP 事件

SEP 事件对于飞行器的安全具有重要影响. 大量的研究表明,渐进型的 SEP 事件绝大多数是由激波产生的^[37]. 因此激波对行星际空间的影响不仅仅



From the top to the bottom, the panels show the magnetic field strength, the z -component of magnetic field in GSM coordinates, the elevation and azimuthal angles of magnetic field vector, Dst index, proton temperature and β .

The vertical solid line mark the position of the shock front

图 14 ACE 和 Wind 卫星观测到的一次激波穿越磁云的事件^[36]

Fig. 14 An event of a shock propagating through a magnetic cloud observed by ACE and Wind spacecraft^[36]

在于压缩磁云、传递能量,还在于它是高能带电粒子的重要加速源.激波加速高能带电粒子的能力取决于多种因素,如激波的强度、可被加速的粒子个数、被加速粒子的初始能量,以及粒子加速过程中的反馈机制等^[43],而这些都受到激波周围的等离子体环境和磁场拓扑结构的影响.在相同的背景环境下,CME 的速度基本决定了激波的强度,同时也决定了 SEP 事件的强度^[44].但如果背景环境改变的话,即使是快速的 CME 也不一定能产生大的 SEP 事件,反之亦然^[45].

在多重磁云的形成过程中,当后一个磁云足够快时,它所驱动的激波就会进入前一个磁云的内部,形成类似图 14 所示的现象.这种现象中,激波周围的磁场位形与行星际空间中的激波周围的磁场位形截然不同.前一个磁云中的同一根磁力线将多次穿越该激波,从而使得带电粒子可以被多次加速. Shen 等^[46]研究了第 23 太阳周的最强的 SEP 事件,发现该事件就是由于磁云创造了有利于激波加速粒子的磁场拓扑结构,使得大量的高能粒子能够在磁

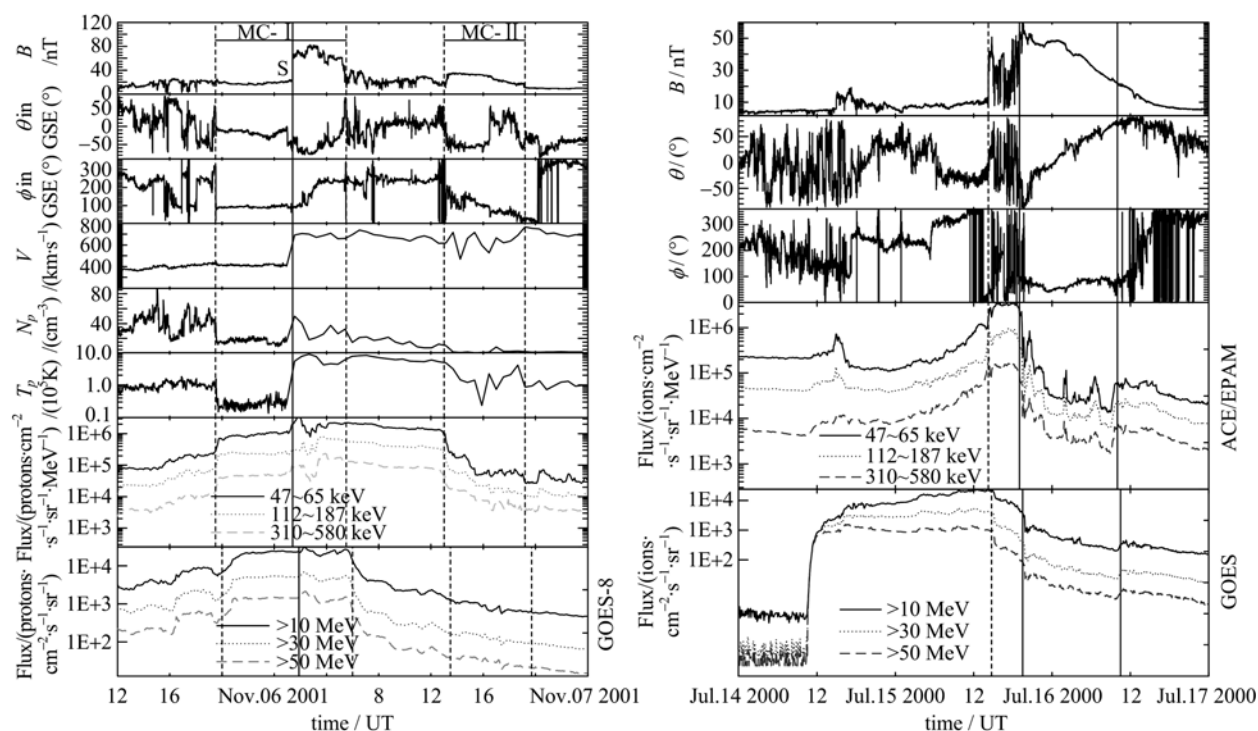
云内被多次有效加速,高能粒子通量在磁云内部形成增强区(见图 15(a)最后一个曲线图).进一步的比较研究发现,如果只有一个快速 CME 或磁云,它所驱动的激波造成的高能粒子通量在磁云内是减弱区(如图 15(b)所示).两者的比较说明磁云是一个相对孤立的磁场结构,激波在磁云内部能够有效地加速带电粒子,是太阳高能粒子事件产生的一个非常重要的可能来源.

4 当前研究的瓶颈

虽然人们对多重磁云的研究已有十多年的历史,对磁云的研究有三十多年的历史,在多重磁云的形成、传播和空间天气效应等方面也取得了显著的进展,但仍然有许多问题还没有完全研究清楚.比如我们知道多重磁云是由于磁云相互追赶、相互挤压形成的,但我们并不知道这个过程具体是怎么发生的,在这过程中除了碰撞、压缩、磁场重联、可能的粒子加速等现象外,还发生着什么样的物理过程,它们相互作用的最终结果受到哪些因素的制约,它们的相互作用对磁云的整体结构有何影响,对地球空间环境效应有何影响.

而这些问题的研究瓶颈在于观测技术和能力的限制,体现在两个矛盾上.首先是一维单点观测与磁云的大尺度结构之间的矛盾. Lepping 等^[5]的统计研究表明,磁云在 1 AU 处的空间尺度大约是 0.28 AU.因此任何一个飞船对磁云进行的局地观测都只能是瞎子摸象,探测到的都只是穿越磁云的一个路径.如何从这条路径上的数据反演获得磁云的整体图像,本身就是一个值得进一步研究的问题.对于多重磁云来说,更多的问题还在于观测路径是否恰好经过我们所关心的物理过程发生的区域,比如碰撞挤压区、磁场重联区、粒子加速区等.同一个事件,不同的观测路径,所得的结果也会很不一样.

其次是天空平面中的二维成像观测与视线方向上的一维局地观测之间的矛盾.所谓天空平面是指与观测者的视线方向垂直的平面.目前一维单点观测并不是人们探测和研究磁云的唯一手段,人们还可以利用对日冕和行星际的二维成像观测来研究 CME 或磁云(如图 10).这两种观测各有优缺点.前者只能得到磁云非常局部的信息,包括磁场和等离子体参数,没有全局图像,但这些实测的参数都是确定的.后者是二维成像图,虽然比局地探测数据多一维,也能够大致地展示出磁云的大尺度结构,但成像



It is the same event in Fig.14. The last two panels show the fluxes of energetic protons recorded at 1 AU, which are enhanced within the magnetic cloud.

(a)

Compared with the event on the left, the fluxes of energetic protons are relatively low within the magnetic cloud

(b)

图 15 (a)ACE 卫星观测到的 2001 年 11 月 5~6 日的激波穿越磁云的事件^[46]

(b)ACE 卫星观测到的 2000 年 7 月 15~16 日的孤立磁云事件

Fig. 15 (a) An event of a shock propagating through a magnetic cloud observed

by ACE spacecraft during November 5~6, 2001^[46]

(b) An isolated magnetic cloud observed by ACE spacecraft during July 15~16, 2000

图中得到的参数是不确定的. 投影效应的存在, 使得二维成像获得的都是观测方向上的积分信息. 这两种观测技术可以互为补充, 但问题在于能够清楚地被二维成像技术观测到的结构往往运行在天空平面内, 而局地探测技术又要求该结构能够沿着视线方向运动, 以穿过探测仪器. 另一方面, 这两种观测技术在时间和空间上也存在差异. 成像观测要求被观测的结构离得比较远, 这样才能获得其全局图像; 而局地观测要求探测仪器进入该结构, 这样才能获得其确切的参数. 因此同一个事件往往无法被这两种技术同时探测到.

5 展望

要进一步深入研究行星际空间中的物理过程, 包括多重磁云结构, 我们就必须突破上述的探测瓶颈. 随着人类科技的不断发展, 空间探测技术和方案也是日新月异. 在 2006 年以前, 人类对太阳以及太

阳风暴的观测点仅集中在地球附近, 视角比较单一, 观测的时间和空间分辨率相对比较低. 2006 年美国 NASA 成功发射了 STEREO 双子飞船后, 首次实现了对太阳和行星际空间的多视角观测^[30]. 然而, 目前人类对太阳和行星际空间的探测还主要局限于黄道面内、1 AU 处. 脱离黄道面、更靠近太阳、更多视角、更多探测点是人类空间探测计划的重要目标. 国际上欧空局的 Solar Orbiter, 美国 NASA 的 Solar Probe Plus 和 Solar Sentinels 等都是围绕这一目标的卫星计划. 在我国, 随着经济实力的增长, 深空探测作为我国实现从航天大国到航天强国的跨越式发展的重要组成部分, 也是势在必行. 中国科学院为此启动了空间科学先导专项, 其中以空间天气为主要目标的夸父计划列为第一批支持的卫星项目之一. 可以说人类的活动范围在不断地向深空扩展, 这不仅是人类探索未知的需求, 也是人类生存发展的需求. 由此建立的高技术系统, 以及它们的正

常运行和维护,也越来越依赖于空间环境的保障. 这些都要求我们要加强开展深空探测,更深入地理解空间中的各种现象和物理过程. 随着上述空间探测卫星计划的顺利实施,我们相信行星际物理乃至整个空间科学的研究必将迎来蓬勃发展的黄金时代.

参考文献(References)

- [1] Xue X H, Wang Y M, Ye P Z, et al. Analysis on the interplanetary causes of the great magnetic storms in solar maximum (2000~2001)[J]. *Planet Space Sci*, 2005,53:443-457.
- [2] Zhang J, Richardson I G, Webb D F, et al. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996~2005[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: A10102; doi: 10.1029/2007JA012321.
- [3] Burlaga L, Sittler E, Mariani F, et al. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations[J]. *J Geophys Res*, 1981, 86: 6 673-6 684.
- [4] Klein L W, Burlaga L F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU[J]. *J Geophys Res*, 1982,87:613-624.
- [5] Lepping R P, Jones J A, Burlaga L F. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU [J]. *J Geophys Res*, 1990,95:11 957-11 965.
- [6] Burlaga L F. Magnetic clouds and force-free field with constant alpha[J]. *J Geophys Res*, 1988, 93: 7 217-7 224.
- [7] Hu Q, Sonnerup B U Ö. Reconstruction of magnetic clouds in the solar wind: Orientations and configurations[J]. *J Geophys Res*, 2002,107:1 142; doi: 10.1029/2001JA000293.
- [8] Larson D E, Lin R P, McTiernan J M, et al. Tracing the topology of the october 18~20, 1995, magnetic cloud with $\sim 0.1-10^2$ keV electrons[J]. *Geophys Res Lett*, 1997,24(15):1 911-1 914.
- [9] Zurbuchen T H, Richardson I G. In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections[J]. *Space Sci Rev*, 2006,123:31-43.
- [10] Tsurutani B T, Gonzalez W D, Tang F, et al. Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978~1979)[J]. *J Geophys Res*, 1988, 93: 8 519-8 531.
- [11] Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, et al. What is a geomagnetic storm? [J]. *J Geophys Res*, 1994, 99: 5 771-5 792.
- [12] Gonzalez W D, Tsurutani B T, Gonzalez A L C. Interplanetary origin of geomagnetic storms[J]. *Space Sci Rev*, 1999,88:529-562.
- [13] Wang Yuming, Shen Chenglong, Ye Pinzhong, et al. Comparison of space weather effects of two major coronal mass ejections in late 2003[J]. *J Univ of Sci & Tech of China*, 2007,37:859-867.
- [14] Richardson I G, Cane H V. The fraction of interplanetary coronal mass ejections that are magnetic clouds: Evidence for a solar cycle variation [J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L18804; doi: 10.1029/2004GL020958.
- [15] Wang Y M, Wang S, Ye P Z. Multiple magnetic clouds in interplanetary space[J]. *Sol Phys*, 2002, 211:333-344.
- [16] Nitta N V, Hudson H S. Recurrent flare/CME events from an emerging flux region[J]. *Geophys Res Lett*, 2001,28:3 801-3 804.
- [17] Wang Y M, Ye P Z, Wang S. Multiple magnetic clouds: Several examples during March-April, 2001 [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1 370; doi: 10.1029/2003JA009850.
- [18] Wang Yuming, Shen C L, Wang S, et al. An empirical formula relating the geomagnetic storm's intensity to the interplanetary parameters: $-\sqrt{VB_z}$ and Δt [J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30 (20): 2 039; doi: 10.1029/2003GL017901.
- [19] Burlaga L F, Plunkett S P, St Cyr O C. Successive CMEs and complex ejecta[J]. *J Geophys Res*, 2002, 107:1 266; doi: 10.1029/2001JA000255.
- [20] Vandas M, Odstrcil D, Watari S. Three dimensional MHD simulation of a loop-like magnetic cloud in the solar wind[J]. *J Geophys Res*, 2002,107(A9):1 236; doi: 10.1029/2001JA005068.
- [21] Hu Qiang, Smith C W, Ness N F, et al. Multiple flux rope magnetic ejecta in the solar wind[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109 (A3): A03102; doi: 10.1029/2003JA010101.
- [22] Riley P, Linker J A, Mikić Z, et al. Using an MHD simulation to interpret the global context of a coronal mass ejection observed by two spacecraft [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1 272; doi: 10.1029/2002JA009760.
- [23] Owens M J. The formation of large-scale current sheets within magnetic clouds[J]. *Sol Phys*, 2009, 260:207-217.
- [24] Wang Yuming, Zheng Huinan, Wang S, et al. MHD simulation on the formation and propagation of multiple magnetic clouds in the heliosphere [J]. *Astron & Astrophys*, 2005,434:309-316.
- [25] Lugaz N, Manchester IV W B, Gombosi T I. Numerical simulation of the interaction of two coronal

- mass ejections from Sun to Earth[J]. *Astrophys J*, 2005, 634:651-662.
- [26] Gonzalez-Esparza J A, Jeyakumar S. Propagation and interaction of interplanetary transient disturbances numerical simulations[J]. *Adv in Space Res*, 2007, 40: 1 815-1 820.
- [27] Xiong Ming, Zheng Huinan, Wu S T, et al. Magnetohydrodynamic simulation of the interaction between two interplanetary magnetic clouds and its consequent geoeffectiveness[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112:A11103; doi: 10.1029/2007JA012320.
- [28] Shen F, Feng X S, Wang Yuming, et al. Three-dimensional MHD simulation of two coronal mass ejections' propagation and interaction using a successive magnetized plasma blobs model[J]. *J Geophys Res*, 2011, 116:A09103; doi: 10.1029/2011JA016584.
- [29] Shen Chenglong, Wang Yuming, Wang Shui, et al. Super-elastic collision of large-scale magnetized plasmoids in the heliosphere[J]. *Nature Phys*, 2012, 8:923-928.
- [30] Kaiser M L, Kucera T A, Davila J M, et al. The stereo mission: An introduction[J]. *Space Sci Rev*, 2008, 136:5-16.
- [31] Shen Fang, Shen Chenglong, Wang Yuming, et al. Could the collision of CMEs in the heliosphere be super-elastic? Validation through three-dimensional simulations[J]. *Geophys Res Lett*, 2013, 40:1 457-1 461.
- [32] Xu X, Wei F, Feng X. Observations of reconnection exhausts associated with large-scale current sheets within a complex ICME at 1 AU[J]. *J Geophys Res*, 2011, 116:A05105; doi: 10.1029/2010JA016159.
- [33] Lugaz N, Farrugia C J, Manchester IV W B, et al. The interaction of two coronal mass ejections: Influence of relative orientation [J]. *Astrophys J*, 2013, 778:20; doi: 10.1088/0004-637X/778/1/20.
- [34] Marubashi K, Lepping R P. Long-duration magnetic clouds: a comparison of analyses using torus- and cylinder-shaped flux rope models[J]. *Ann Geophys*, 2007, 25:2 453-2 477.
- [35] Dasso S, Mandrini C H, Schmieder B, et al. Linking two consecutive nonmerging magnetic clouds with their solar sources[J]. *J Geophys Res*, 2009, 114:A02109; doi: 10.1029/2008JA013102.
- [36] Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. An interplanetary cause of large geomagnetic storms: Fast forward shock overtaking preceding magnetic cloud[J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30 (13): 1 700; doi: 10.1029/2002GL016861.
- [37] Cane H V, Stone R G, Fainberg J, et al. Radio evidence for shock acceleration of electrons in the solar corona[J]. *Geophys Res Lett*, 1981, 8:1 285-1 288.
- [38] Cairns I H, Knock S A, Robinson P A, et al. Type II solar radio bursts: Theory and space weather implications[J]. *Space Sci Rev*, 2003, 107:27-34.
- [39] Gopalswamy N, Yashiro S, Kaiser M L, et al. Radio signatures of coronal mass ejection interaction: Coronal mass ejection cannibalism? [J]. *Astrophys J*, 2001, 548:L91-L94; doi: 10.1086/318939.
- [40] Reiner M J, Vourlidas A, St Cyr O C, et al. Constraints on coronal mass ejection dynamics from simultaneous radio and white-light observations [J]. *Astrophys J*, 2003, 590:533-546.
- [41] Gonzalez W D, Tsurutani B T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT)[J]. *Planet Space Sci*, 1987, 35:1 101-1 109.
- [42] Tsurutani B T, Gonzalez W D, Gonzalez A L C, et al. Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle[J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(A11):21 717-21 734.
- [43] Reames D V. Particle acceleration at the sun and in the heliosphere[J]. *Space Sci Rev*, 1999, 90:413-491.
- [44] Reames D V. Particle acceleration by CME-driven shock waves[C]//Dingus B L, Kieda D B, Salamon M H. Invited, Rapporteur, and Highlight Papers, volume 516 of AIP Conf Proc. Salt Lake City, USA: AIP, 2000:289-300.
- [45] Shen Chenglong, Wang Yuming, Ye Pinzhong, et al. Strength of coronal mass ejection-driven shocks near the sun, and its importance in predicting solar energetic particle events[J]. *Astrophys J*, 2007, 670:849-856.
- [46] Shen Chenglong, Wang Yuming, Ye Pinzhong, et al. Enhancement of solar energetic particles during a shock-magnetic cloud interacting complex structure[J]. *Sol Phys*, 2008, 252:409-418.