

日冕物质抛射与共生射电爆发的 地面和空间联测研究

李春生^{1,2} 傅其骏¹

(1. 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2. 南京大学天文系 南京 210093)

摘 要

引述了近年来太阳和空间物理的一大研究成果：产生日地空间射电爆发和地球物理响应的主因不是太阳耀斑，而是日冕物质抛射 (CME)；论述了射电爆发在研究 CME 中的作用；分析了 1991-06-15 CME 事件中射电爆发和质子事件产生的物理过程；介绍了地面 / 空间对 CME 和共生射电爆发联测研究的新进展；提出了我国今后开展地面 / 空间联测研究的设想和建议。

关键词 太阳 — 日冕物质抛射 — 射电爆发 — 激波 — 磁重联 — 地球物理响应

分类号 P182.62, P162.11

1 太阳“耀斑神话”的终结与日冕物质抛射研究热的兴起

20 世纪 80 年代以前，太阳上发生的各种高能爆发、物质抛射以及相应的地球物理响应 (包括行星际激波、质子事件 / 地磁暴等) 都归结为太阳耀斑发展进程中的派生现象，从而形成了太阳物理中所谓的“耀斑神话”。然而对太阳大量的地面仪器和空间航天器的联测资料表明，事实并非如此。当 Kahler 等人^[1~3] 利用这些联测资料发现大的高能质子事件与日冕物质抛射 (CME) 之间存在着 96% 的密切相关性之后，论证了这些高能质子都是在 CME 驱动的激波处得到加速的，从而给予了“耀斑神话”一次极大的打击。Gosling^[4] 根据大量联测资料分析得出了地磁暴、高能粒子事件和行星际激波的起因不是耀斑而是 CME 的结论，首先提出了：太阳“耀斑神话可以终结”的论断，引起了近十余年来太阳物理界和地球物理界的一大学术争论，争论的焦点就是谁是引起上述地球物理响应的主因？1999 年美国发表了 SMM 航天器从 1981 年发射以来与地面仪器联测的结果，其中最引人注目的成果就是 SMM 的大量观测所证实了的日地物理的因果关系^[5,6]，这种因果关系如图 1 所示。

可见：

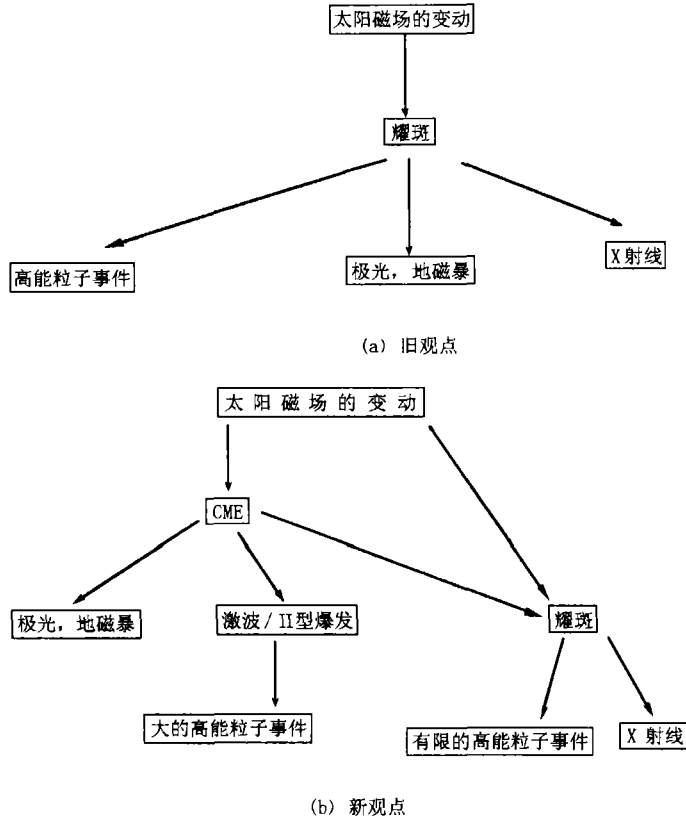


图 1 日地物理的因果关系示意图^[6]

(1) 太阳磁场变动释放的磁能可以产生 CME, 也可以产生耀斑; 磁场的变动, 既包括磁位形的改变也包括磁等离子体的运动; 但磁场变动产生 CME 和耀斑的物理过程却并非一致的。

(2) 占有大空间范围的 CME 由于内部磁场的变动可以产生耀斑 (辐射); 而占有小空间范围的耀斑不会导致 CME 的出现。

(3) 快速 CME 驱动的激波对粒子的长时间加速过程可使质子能量高达几十 GeV (电子能量可达几百 MeV), 因而可以产生大的高能粒子事件, 而耀斑只能引起有限的高能粒子事件。

太阳“耀斑神话”的终结越来越引起人们对 CME 研究的兴趣, 现在已经基本了解到太阳快速 ($v > 500\text{km/s}$) CME 出现的过程。CME 出现时, 将大块磁等离子体物质抛向日地空间或行星际空间, 并驱动日冕 / 行星际激波的产生, 使低能粒子 (电子、质子和离子) 得到加速而变成高能粒子。这些高能粒子和激波能够损害空间航天器中科学仪器的功能和人身安全, 并阻碍航天器的空间航行, 形成灾害性的空间天气, 同时也构成所谓的“太阳风暴”事件, 产生严重的地球物理响应。例如高能质子事件、地磁暴等。1989 年 3 月 CME 事件产生的“太阳风暴”中的大磁暴, 最著名的效应就是 3 月 13 日 ~14 日引起的加拿大 Quebec 水力发电系统的失灵、无线电通讯信号的失落、航天器航行阻力的增强^[7]。由此可见, 在航天事业日益发展的今天, 具有实用价值的太阳风暴“实时”预报的兴起是必然的。

对于太阳物理和日地空间物理来说, CME 的产生机制及其与日冕和行星际介质相互作用

用的物理过程研究肯定具有极其重要的意义, 因此开展我国空间和地面射电物理的联合观测也就十分必要了。

2 射电爆发观测在 CME 研究中的作用

CME 在产生和发展过程中与日冕和行星际介质(磁等离子体)相互作用并发出不同波长的射电爆发辐射, 成为 CME 发展进程中的射电特征。最显著的有微波 / 分米波的 IV 型、米波和十米波的 II 型 / IV 型、III 型以及行星际 (IP) II 型等射电爆发^[7~8]。

2.1 II 型射电爆发

日冕 / 行星际介质中的 II 型 / IP II 型射电爆发是在高密度 CME 驱动的激波处, 受加速的高能电子于当地等离子体频率和 / 或其谐波频率上发出的等离子体辐射, 因此它的出现意味着有相应的日冕激波 / IP 激波的传播, 而快速的激波对质子 / 离子的加速更为有利。

Reames 等人^[9]指出, 当激波经过时的速率超过 500km/s 时, 有可能发生高能粒子事件 (SEP 事件), 而速度 > 750 km/s 时, 总可产生 SEP 事件, 但只有最快的、约占总数 (1~2)% 的 CME 可引起质子加速, 这些 CME 的速率常可达 2000km/s, 并产生 IP 激波 / IP II 型爆发。大而慢的 CME 和磁云都不能产生 SEP 事件。如 1997 年 1 月 6 日~10 日出现的 CME, 在 1 月 6 日日面中央子午线上升时为晕状, 1 月 10 日变成磁云到达地球, 引起一剧烈的地磁暴^[10]。虽然它也出现过 II 型爆发, 但并未观测到行星际质子事件。当时激波经过速率为 385~490km/s, 仅仅超过周围太阳风的速度^[11]。一般情况下, 在质子流量开始增大前都会出现快速 CME 产生的米波 II 型爆发, 这表明 CME 驱动的激波对质子加速过程已经开始。从图 2 中 3 个高能地面水平增强事件 (GLE 事件) 的比较可以看出, 它们的峰值质子流量都是出现在共生质子事件位于日面高度约 5~15 R_{\odot} 的范围内^[12]; 3 个 GLE 事件都是由上述快速 CME 驱动的快速 II 型激波对质子加速引起的。CME 产生的 II 型爆发的持续时间愈长就愈能使质子加速到更高的能量, 例如 1989 年 9 月 29 日就记录到能量高达 21GeV 的强 GLE 事件。

2.2 IV 型爆发 (含分米波 IV dm 和米波 IV m 型)

IV 型爆发分为运动 IV 型和稳定 IV 型, 前者是 CME 中央部分运动时等离子体团在穿经日冕或外层空间时发出的回旋同步辐射, 而后者则是稳定大耀斑环发出的回旋同步辐射。只有当等离子体团的电子密度远大于背景日冕密度时, 才可发出等离子体辐射。观测表明, 米波或十米波 IV 型爆发常与 II 型爆发共生。最近, 有许多研究者指出: 米波 II 型爆发以及与它们伴随的 Moreton 波和千米波 II 型爆发都是快速 CME 驱动的激波所激发的^[13]。Wind 航天器上的 WAVES 实验观测到的 1~14Hz(波长 300~21.4m) 的 II 型射电爆发也认为是由低日冕中高度为 1 R_{\odot} 处的 CME 驱动的激波运动到外日冕时所激发的^[13]。

2.3 微波爆发

微波爆发除尖峰辐射外, 一般都是回旋同步辐射。有趣的是对于长持续时间 (> 30 min) 的微波爆发, 不管是具有强脉冲相还是弱脉冲相, 它们都与喷发日珥 (或暗条) 和高能质子事件有着较密切的共生关系^[14,15]。由于喷发日珥是 CME 的一种表现形式, 因而微波爆发多出现在 CME 的初始阶段: 喷发相和喷发后相中。

III 型爆发参看 4.2 节。

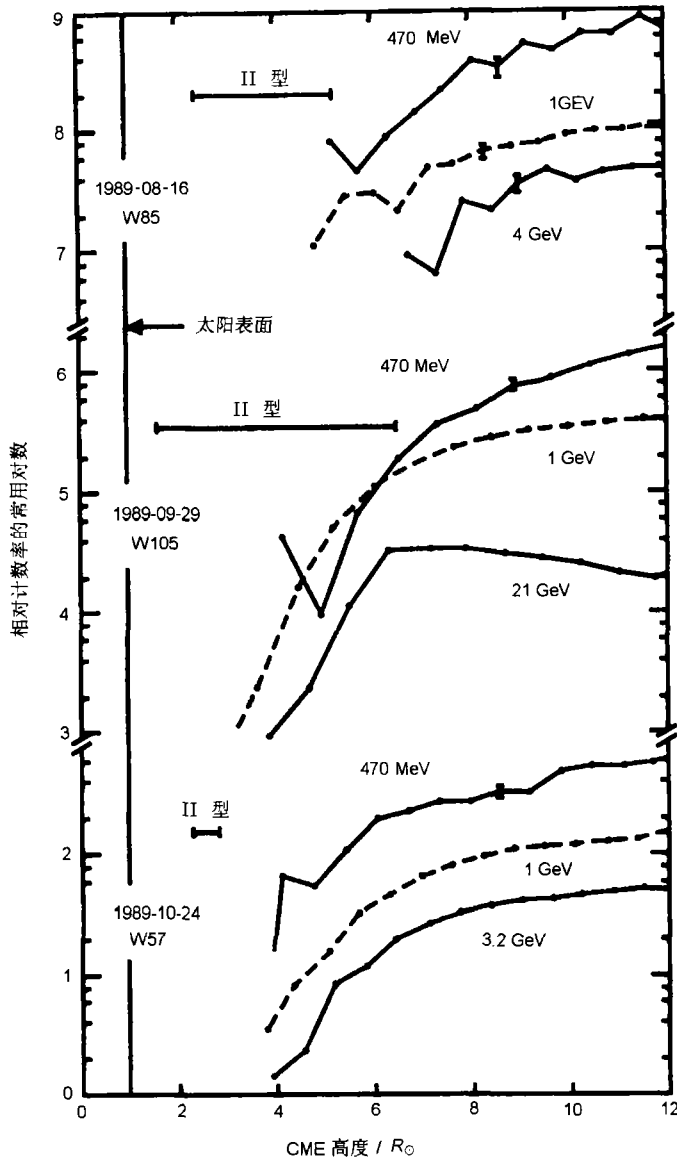


图 2 3 个地面水平增强事件的质子喷射轮廓图 (已扣除背景后的相对计数率)^[12]

从上到下依次为 1989-08-16GLE: 470MeV(HEPAD)、1GeV(Kerguelen) 和 4GeV(Climax) 的轮廓图; 1989-09-29GLE:470 MeV(HEPAD)、1GeV(Cargary) 和 21GeV(Mt. Norikura) 的轮廓图; 1989-10-24 GLE:470 MeV(HEPAD)、1GeV(Kerguelen) 和 3GeV(Moskow) 的轮廓图。

3 1991-06-15 的 CME 事件分析和相应解释

本事件是 22 周太阳活动峰年期间, 活动区 AR6659 发生的一个快速 CME 和剧烈地球物理响应事件, 当时该活动区正处于最佳日面位置。1991 年 6 月 15 日以后, 该活动区转至太阳

背面,但质子流仍很强。质子事件开始于6月14日23:40UT;峰值在6月15日19:50UT,峰值流量为1400 p.f.u.(质子能量 > 10 MeV),对应的大耀斑为双带耀斑 X12/3B,日面位置 N33、W69;极大在6月15日08:21UT。从太阳地球物理资料(SGD)查得这一天09:00~11:00UT出现20%的GLE,22:30UT产生极盖吸收(PCA),这表明当天有能量大于0.5GeV的质子到达地面,这些高能质子都是由快速($\geq 2000\text{km/s}$)CME所驱动的激波在日面高度5~115 R_{\odot} 处加速的。从SGD查得的该事件的有关资料列于表1中。

表1 1991-06-15事件的射电观测资料

观测台站	观测时间 /UT		位置		频率和波长	事件种类
	开始	结束	RA	R/R_{\odot}		
WRDC	07:30	08:05	310	0.07	H α	活动区喷发日珥
ONDR	08:13.5	10:32.1			分米波,米波	II型,脉动
POTS	814.2	1146.0			800~400MHz	II型谐波,IV型
SVTO	08:16.0	08:21.0			米波	II型
WETS	08:16.2	08:54.4			280~30MHz	II型谐波

从表1还可看出,出现于07:30~08:05UT的活动区喷发日珥很可能就是活动区AR6659上空磁结构系统重组的触发源。又从SGD上查得这一天在07:38~07:45UT附近出现一厘米波(6~17GHz)简单爆发,其流量仅为18~40 s.f.u.,这同耀斑前预热和软X射线前兆一致,也可能是CME前兆的射电特征(参看图5和图6(b))。

3.1 厘米波 - 分米波爆发轮廓的启示

1991年6月15日的CME事件中,IZMIRAN和Trieste天文台观测到169~300MHz的总射电流量和高能 γ 射线辐射的时间轮廓。如图3所示^[16],其第一部分对应于主耀斑相和活动区日珥的喷发,有很强的脉冲相,在08:17UT峰值流量高达 2×10^4 s.f.u.,脉冲相持续约7min后,射电流量陡降。图4给出了射电爆发辐射的频谱;其第一部分(脉冲相)峰值流量谱是根据Learmonth天文台(SGD,1991)在08:13~08:17UT时段观测得到的^[16],它类似于李春生等人^[17,18]在探讨1972年7月7日事件中从毫米波到米波IV型爆发的U形谱。当厘米波高频部分变硬(即变得更平坦)时,就可实时预报有质子事件发生。Pick(1982)指出^[19],在文献[17]中已经证认这种U形谱的产生机制是回旋同步加速辐射。1972-08-07事件中U形谱上的“低谷”位于约550MHz处,而1991-06-15事件中,其“低谷”则位于约2GHz处,这些“低谷”实际上对应于CME喷发时形成的“重联区”位置。我们认为,当太阳大气中两个电流环相互趋近或有电流环从色球冒出而同已有的低冕电流环相互作用激烈时,在小尺度的重联区中会产生平行于磁力线的直流电场(参看图5)。其中ab(中性电流片)右侧,直流电场 E 使质子往下喷注到稠密的色球层,与重离子相互作用而发出 γ 射线谱线或同高密度的等离子体相互作用产生 γ 射线连续辐射。与此同时,在直流电场作用下,有的电子向上喷出,绕磁力线回旋而产生分米波IV型爆发,其峰值流量构成U形谱的分米波翼;在ab左侧,平行于磁力线的直流电场使质子向上喷注,并使电子往下喷注绕磁力线回旋而产生厘米波爆发,其峰值流量组成U形谱的厘米波翼。往上喷注的质子有的沿磁力线,有的绕磁力线而运动至激波处,不断受到加速,当达到高能状态(几十个MeV,甚至 $\geq 1\text{GeV}$)时,就沿开放场线逃逸而形成行星际空间质子事件,或GLE事件(质子能量 $\geq 1\text{GeV}$)。由于质子的质量远大于电子的质量,在直流电场 E 作用下,ab右侧的质子往下喷注到色球深层而发出的 γ 射线辐

射都是在微波爆发辐射脉冲相之后出现的(参阅文献[16]中的图5)。

从图3查得厘米波-分米波爆发的脉冲相即CME的喷发相约从08:13~08:20UT,而表1中查得有5个射电天文台站在CME的喷发相内观测到分米波和米波II型爆发,WRDC台于08:20UT开始观测到有十米波II型爆发,这些事实表明日冕的II型爆发产生在CME的喷发相。

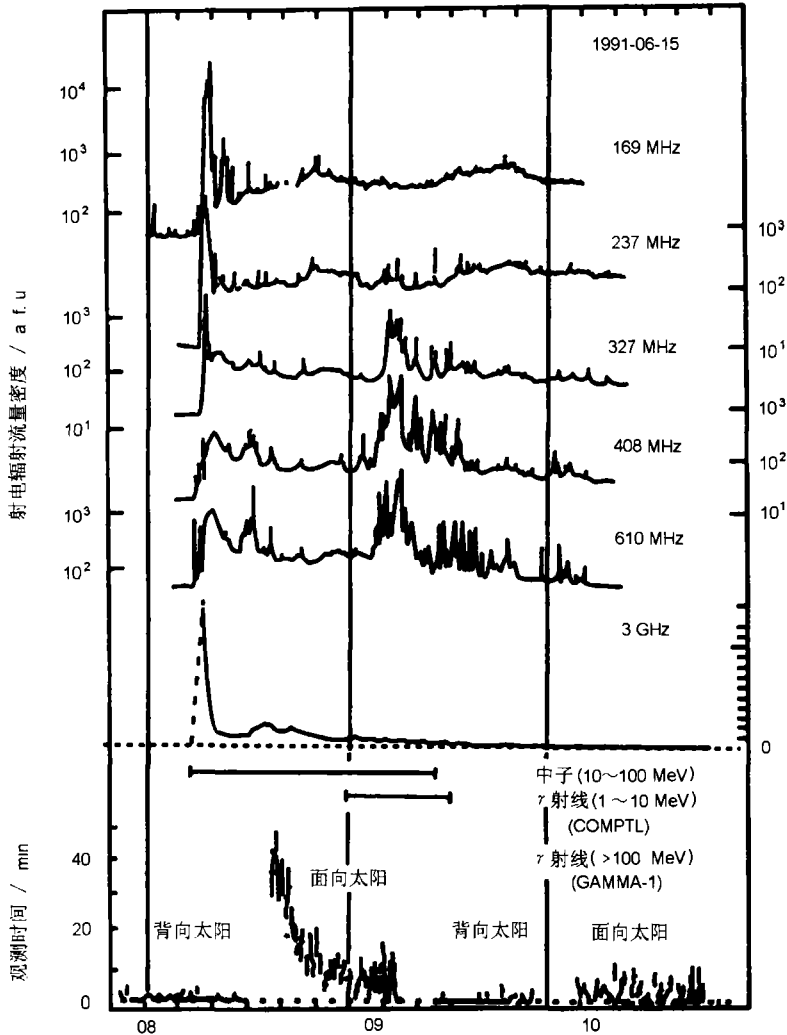


图3 1991-06-15CME事件中高能辐射的观测时间轮廓图 [16]

上一部分为该事件中 IZMIRAN 台观测到的 169MHz 和 3GHz 射电流量 (sfu) 轮廓以及 Trieste 台测量 237、327、408、618MHz 右旋圆偏振射电流量轮廓;中间部分的两条横线分别是根据 COMTEL 资料计得中子 (10~100MeV) 的产生时间和对 γ 射线 (1~10MeV) 的观测时间;最下部分为 GAMMA-1 卫星对 γ 射线 (> 100MeV) 的观测轮廓。

3.2 喷发后的能量释放与粒子加速

由图3可见,微波频率3GHz的爆发时间轮廓分为脉冲相与延迟相两部分,前者的峰值流量已计入图4的峰值流量谱中,后者的射电流量陡降,但持续时间达2h以上,因此厘米波

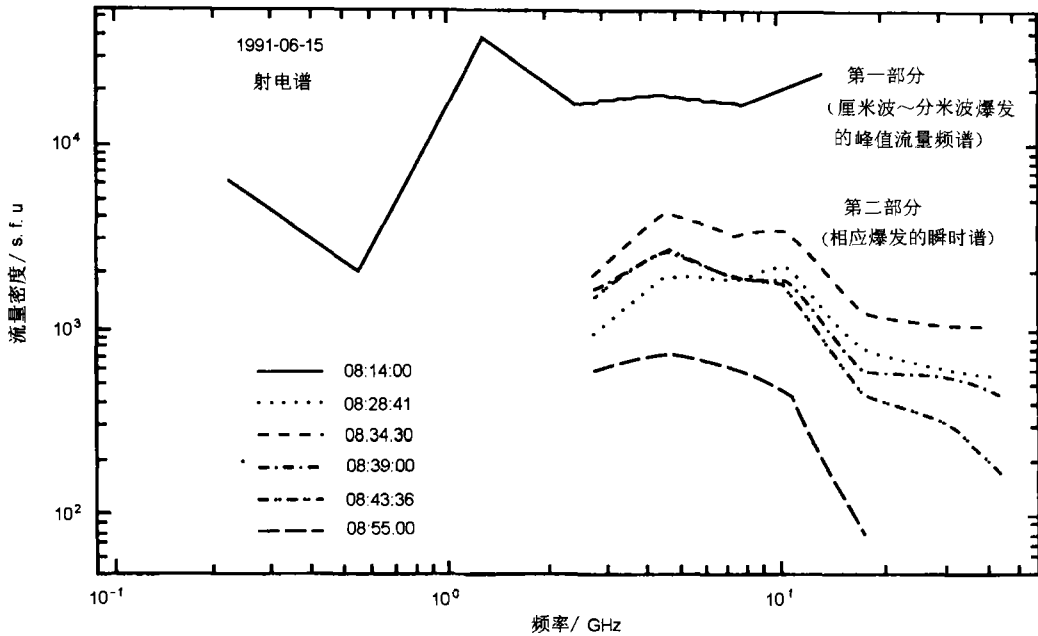


图 4 1991-06-15 事件在 08:13~08:17UT 厘米波 - 分米波爆发的峰值流量谱以及延迟分量在 08:28:41~08:53UT 的瞬时谱^[16]

中的微波爆发第 2 部分的频谱，只能构成瞬时频谱，即图 4 右下角的 5 条频谱曲线。

对于图 4 所示的脉冲相与延迟相两部分频谱形成的物理过程，Akimov (1996)^[16] 提出用 CME 喷发和喷发后的能量释放来解释。在大尺度日冕磁结构不稳定的影响下，CME 开始喷发。毫无疑问，当 CME 经过日冕时，日冕大面积受到扰动；CME 后，受扰动的磁场将通过磁重联弛豫到初始状态，这种弛豫伴随着长时间（第 2 次）的能量释放和有效的粒子加速^[21,22]，日冕磁场的重新组建导致新的、更高冕环的形成，并产生强度逐渐减小的微波爆发频谱的第 2 部分（延迟部分）（见图 4、图 6(a) 和图 6(b)）。

3.3 喷发后分米波爆发的新特征

Akimov 等人^[16] 发现在该事件的运动频谱中，尤其是喷发相之后，出现 U 形爆发，在分米波 / 厘米波范围内，射电辐射是慢漂移、多波段的 II 型爆发和具有丰富精细结构（尖峰辐射和脉动）的强连续 IV 型爆发的混杂重叠，这显示了 1991-06-15 事件中又一射电特征^[21]。Zlobec 和 Karlisky^[22] 也观测到上述同一事件在喷发后相的窄带分米波 - 尖峰，并把这些尖峰看作是磁流体力学 (MHD) 级联波中受加速的非热电子的射电特征。尖峰的演化和它们的参量变化可以利用具有湍动等离子体流出的耀斑重联模型来定性讨论。

目前 CME 的物理过程可用各种不同的模型来解释，而图 5 所示的模型对于 1991-06-15 CME 事件的物理过程会有一个较全面地理解。

4 地面 / 空间射电联测研究的新进展

地球电离层对地外低频射电波的截止作用，使得地面射电镜观测不到低于 18MHz 频率的

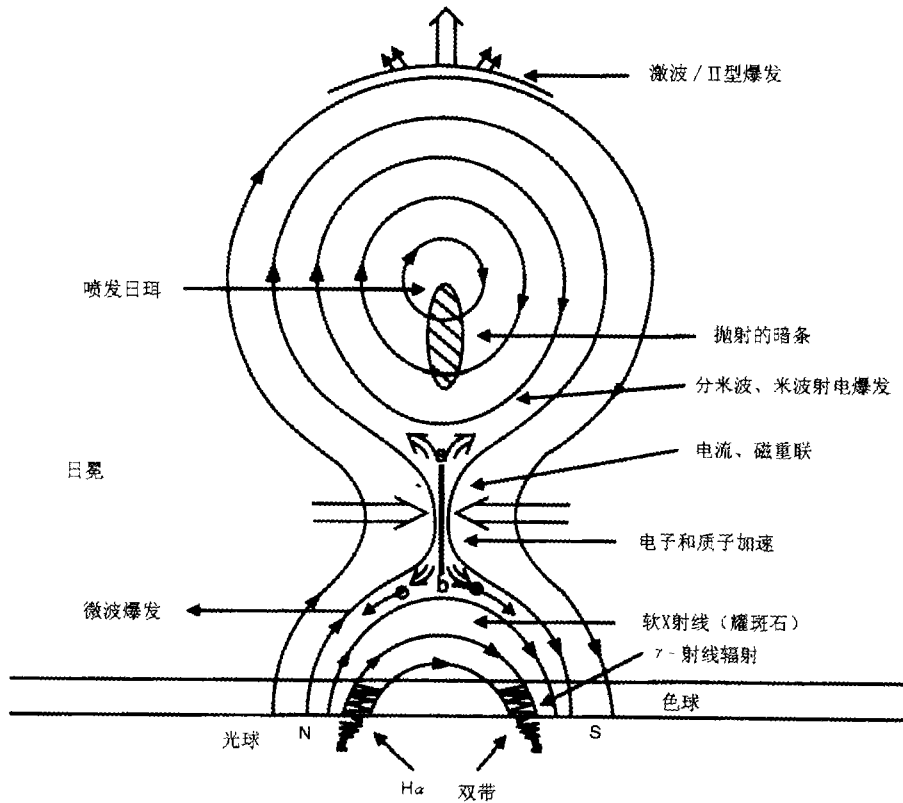


图 5 快速 CME 的简化模型 [28]

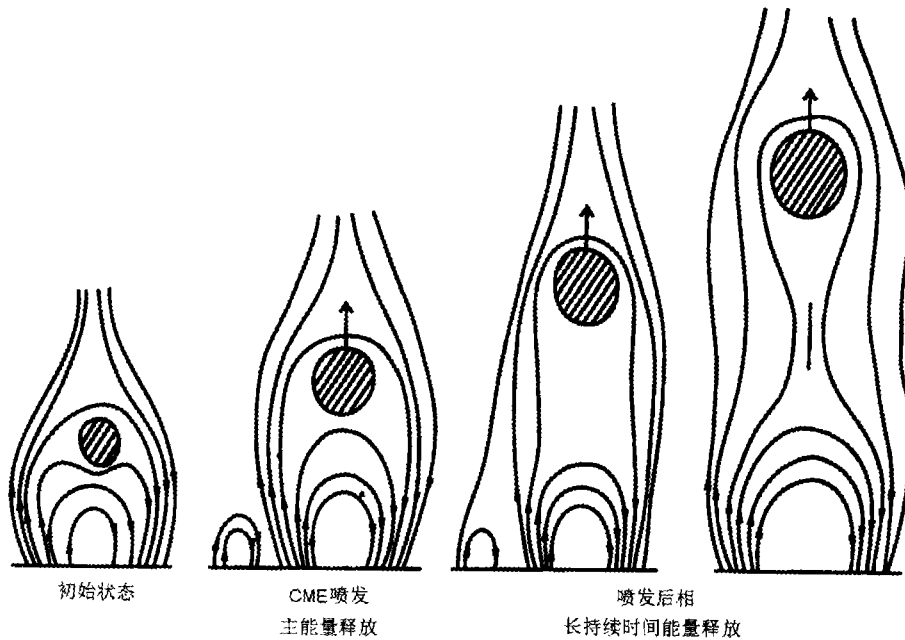


图 6 (a) CME 发展过程中的 3 个相 [22]

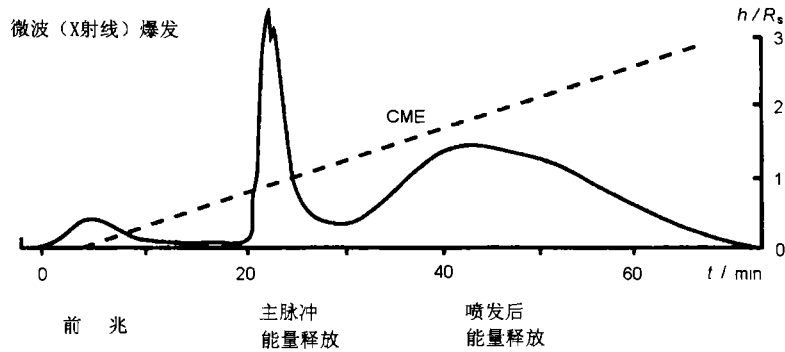


图 6 (b) 同 CME 喷发相与喷发后相对应的微波爆发时间轮廓图 [16]

辐射, 从而必须借助航天器上装载的相应射电频谱仪 (甚至光学日冕仪) 进行同时的地面 / 空间联测, 方可获得从太阳向地球方向喷发的日冕物质抛射行经日地空间时产生的各种射电、光学和 X 射线等物理过程以及地球物理响应的有关信息。

最近几年来, 在射电联测方面取得了一些可喜的新进展。

4.1 1997-11-04 太阳 II 型激波事件的地面 / 空间射电频谱仪的联测

1997-11-04 事件, 利用澳洲 Culgoora (1800~18MHz) 和 Bruny Island (37~10MHz) 的射电频谱仪以及 Wind 航天器上的 WAVES 实验 (13.8~0.03MHz) 同时进行观测, 复盖了从 1800MHz 到 0.03MHz 的频率范围而无任何间断, 记录到该事件 III 型、II 型和 IV 型爆发的射电资料。这些射电爆发资料与 SOHO 航天器上的 LASCO 日冕仪观测相配合, 可以得知该事件中 CME 的激波扰动 [24]。

1997 年 11 月 4 日 05:54UT, 有一个 2B/ \times 2.1 的光学耀斑出现在日面 S14°、W33° 处; 射电频谱仪记录到脉冲相开始于 05:55UT, 在耀斑和 CME 喷发后约 65h, 即在 11 月 6 日 22:40UT 该太阳扰动到达地球并产生很强的激波; 强激波后 5h, CME 物质才到达地球, 这就证明该激波是由 CME 驱动的。1997-11-04 事件的地面联测表明, CME 的喷发时间与脉冲耀斑和 II 型激波起动的的时间符合到 1~2min 以内。在天空平面内 CME 速度接近于 II 型激波速度, 从在 1.26~78 R_{\odot} 处导得的速度以及 1AU 处检测到的激波速率 (平均值) 都是 646km/s。该事件的地 / 空联测说明, II 型激波、CME 和耀斑是相互紧密相关的, 日冕和行星际激波是分不开的, 它们极可能是日心距 $\leq 1.3R_{\odot}$ 处同一个大尺度磁场不稳定过程所引发的一系列现象, 并继续向外扩延产生一个强激波和重要的地球物理响应 [24]。

4.2 II 型激波加速与低频 IV 型连续谱辐射和 SA III 型爆发的产生过程研究

(1) II 型激波加速与 IV 型连续谱辐射

在太阳活动峰年期常产生有 II 型 / IV 型射电爆发。日冕中大多数 II 型爆发之前, 会有一群 III 型爆发出现 (称之为正常 III 型爆发) 并后随有连续谱辐射 (IV 型), 称为耀斑连续谱辐射 II (Flare-Continaum II), 简称 FC-II 型爆发。

在 1998-05-02 事件中, Wind 航天器上的 WAVES 实验观测到一个频率低到 7.5MHz (40m 波长) 的 FC-II 爆发。它产生在径向距离 2.5~3 R_{\odot} 处, 在 13.8MHz 上持续 2h 以上 (如图 7 所示), 而在 7.5MHz 上持续约 1h, 这意味着它们依次是谐波和基波上的等离子体辐射。7.5MHz

上的谐波为 13.8MHz 左右, 产生的径向距离约 $3R_{\odot}$, 因此快速电子必然早就在激波高度达到 $3R_{\odot}$ 处沿开放磁力线受到加速, 并发出等离子体波辐射, 而被磁环俘获的快速电子则残留很长的时间, 逐渐作指数式衰落^[25]。众所周知, 处在 $3R_{\odot}$ 的磁环是不稳定的, 它被太阳风拽长延伸。本事件中, II 型激波开始于耀斑闪光相和 LASCO 观测到的 CME 升离时间的几分钟以内, II 型激波、天空平面内 CME 以及从日冕到 1AU 处的激波的速率全都在 1000km/s 左右。CME 前端的升离时间和径向速率的计算以及上述结果证明, 日冕 II 型爆发不是在 CME 前端的激波中产生的, II 型激波和耀斑连续谱辐射都是产生在 CME 前端的尾部^[25]。Leblanc 等人分析了 1997-11-03 事件中两个低频 II 型爆发也得到了同样的结论^[26]。

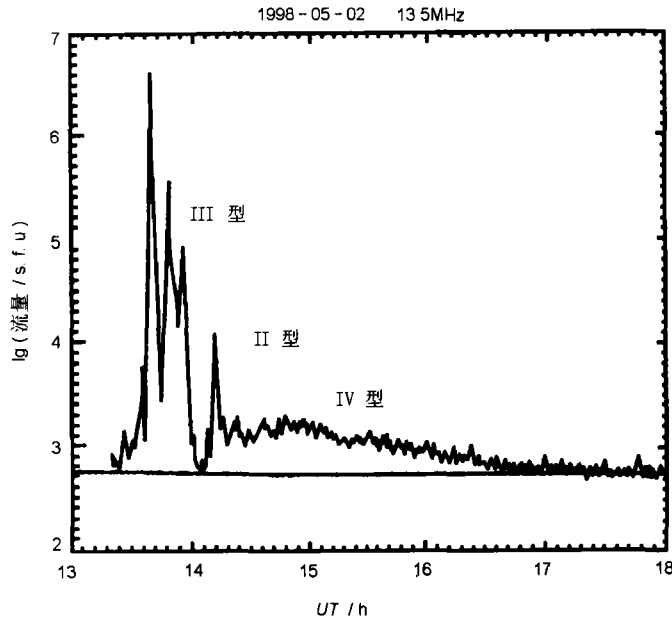


图 7 在 13.8MHz 的固定频率上, 显示出一群 III 型爆发、II 型爆发以及 IV 型耀斑连续谱辐射^[25]

II 型耀斑连续谱辐射是以 II 型爆发开始的, 接着按指数式逐渐衰落。

(2) II 型激波波前的电子加速与 SA III 型爆发的产生

Dulk 等人 (2000) 根据文献 [24] 中使用的地面 / 空间射电频谱仪的联测指出, 联测的射电频谱仪可观测从日冕到 1AU 处的空间。他们利用 1997-04-07~1999-06-04 期间观测到的 8 个 CME 与射电爆发共生的事件, 得到这样的结论: 日冕中 II 型爆发发出的激波可使沿开放磁力线运行的电子受到加速并产生 III 型爆发, 这种 III 型爆发称为激波加速的 III 型爆发 (Shock-accelerated type III bursts), 一般写作 SA III 型爆发。在射电运动频谱图上, SA III 型爆发复盖着从米波到千米波的部分或全部频率范围, 即从约 2GHz 到 $< 0.1\text{MHz}$, 相应的日心距 (或径向距离) 从 $\leq 1.01R_{\odot}$ 到 1AU 处, 因而它也是一种日地空间常见的射电爆发现象^[27]。

上面提供 8 个事件的样本, 全都可以归类为百米波上的“激波加速事件”。在这些事件的完整频谱中常显示出有几个或许多个类 III 型爆发, 它们都是从 II 型爆发附近出现而向低频发展的爆发, 但从未发现其中有高于 II 型爆发频率的辐射。这些 SA III 型爆发的漂移速率与正常

III型爆发相类似, 而且激发电子具有 $0.1c \sim 0.2c$ 的速率或者具有 $3 \sim 10$ keV 或更高的能量。它们常持续到最低的观测频率, 即临近 1AU 处的等离子体频率。由此可知, SA III型爆发起源于 II 型激波中, 是由激波处经加速的高能电子所产生的等离子体辐射。在上述 8 个事件中, 有 3 个事件只包含 SA III型爆发, 其余 5 个事件开始时以正常 III型爆发占优势, 但在事件的较后阶段出现 SA III型爆发^[27]。为了明确地证认出 SA III型爆发并且区分它们同正常 III型爆发之间的贡献, 还需要有更多的近于连续的频率复盖, 特别是从十米波到百米波范围的有关观测资料。

5 对于开展本课题地面 / 空间联测研究的建议

根据以上的调查研究可知, 对于太阳 CME 的观测研究不仅是太阳物理发展的生长点, 也是日地空间物理和地球物理的重要课题。在航天事业日益发展的今天, 具有实际价值的空间 / 太阳风暴预报更显出它的科学意义。由此建议:

(1) 充分发挥国内各台站已建立的射电观测系统 (从厘米波到分米波) 的作用, 开展常规观测, 利用有效的 U 形谱实时预报手段, 进行空间天气 / 太阳风暴预报 (含质子事件警报) 的观测研究。建议在国家天文台原有 $4 \sim 30$ cm 波段基础上, 将快速运动频谱仪扩展到 $1 \sim 100$ cm, 这样就可使中心射电观测站拥有较完备的实时预报手段, 计算出脉冲相的磁重联区域的高度和形成时间, 开展对 CME 的初始相、喷发相和喷发后相中从厘米波、分米波到米波段的各种射电爆发与动力学发展过程关系的研究。

(2) 将地面 / 空间射电联测资料与相应的硬 X 射线、软 X 射线、 γ 射线观测资料进行结合, 全面研究 CME 的产生机制和输运过程; 分门别类地研究质子事件 / GLE 事件、地磁暴、电离层暴、PCA 事件和其他地球物理效应的关系, 提供不同情况下确立 CME 模型的依据。

(3) 第 4.1 节中所述的地面 / 空间联测系统的射电观测, 复盖了 $1800 \sim 0.03$ MHz 的频率范围, 可以观测到从较低日冕到地球附近 1AU 处的射电爆发, 这样的射电联测系统值得我们在为 CME 扰动研究制作相应频谱仪 (地面 / 空间联测系统) 时借鉴和参考。

参 考 文 献

- 1 Kahler S W, Hildner E, Van Hollebeke M A I. *Sol. Phys.*, 1978, 57: 429
- 2 Kahler S W et al. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89: 9683
- 3 Kahler S W et al. *Proc. 20th Cosmic Ray. Conf.*, 1987, 3: 121
- 4 Gosling J T. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 18937
- 5 Crooker N U. *Nature*, 1994, 367: 595
- 6 Ryan J M et al. In: Strong K T et al. eds. *A Summary of the Results from NASA's Solar Maximum Mission*, New York: Springer-Verlag, 1999: 457
- 7 Tandberg-Hanssen E, Emslie A G. *The Physics of Solar Flares*, 1st ed. Cambridge: Cambridge Uni. Press, 1988: 229
- 8 李春生, 傅其骏. *Astros. Rep.*, 2000, 36: 24
- 9 Reames D V et al. *Ap. J.*, 1997, 491: 414
- 10 Fox N J et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25: 2461
- 11 Webb D F et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25: 2469
- 12 Cliver E W, Webb D F, Honard R A. *Sol. Phys.*, 1999, 187: 89

- 13 Reiner M J, Kaiser J J. *J. Geophys. Res.*, 1999, A104: 16979
- 14 Kahler S. *Ap. J.*, 1994, 428: 837
- 15 Reames D V. *Adv. Space Res.*, 1993, 13: 331
- 16 Akimov V V et al. *Sol. Phys.*, 1996, 166: 107
- 17 李春生, 郑兴武, 江淑英等. *天文学报*, 1979, 20: 153
- 18 Li Chunsheng, Zhen Xinwu, Yao Jinxing. In: Shea M A et al. eds. *Proceedings of the STIP Symposium on Solar Radio Astronomy, Interplanetary Scientination and Cordination with Spacecraft*, Narrabri N. S. W., Australia, 1979, Air Foxe Geophysics Laboratory, USAF, 1982: 49
- 19 Pick M. In: Wayman P A ed. *Transactions of the IAU Vol X V III A, Reports on Astronomy*, Dordrecht: D. Reider Publishing Company, 1982: 79
- 20 Chertok I M. In: 24th Int, Cosmic Ray Conf., 1995, 4: 62
- 21 Kryakunova O N, Chertok I M. *Bull Acad. Sci.*, 1999, 63(8): 58
- 22 Chertok I M. *J. Moscow Phys. Sci.*, 1997, 7: 31
- 23 Zlobec P, Karlisky M. *Sol. Phys.*, 1998, 182: 477
- 24 Dulk G A, Leblanc Y, Brougeret J L. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26: 2531
- 25 Leblanc Y et al. *J. Geophys. Res.*, 2000, A105: 18215
- 26 Leblanc Y et al. *J. Geophys. Res.*, 2000, A105: 18225
- 27 Dulk G A et al. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 27343
- 28 Kallenrode M B. *Space Physics*, 1st ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 1998: 181

Studies of Coronal Mass Ejections and Associated Radio Bursts with the Cooperative Observations of Ground-Based and Spaceborne Instruments

Li Chunsheng^{1,2} Fu Qinjun¹

(1. National Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

(2. Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract

The great achivement in solar-terrestrial physics, which the key solar phenomena responsible for interplanetary shocks, non-recurvent geomagnetic storms and large SEPs are caused by the coronal mass ejections (CMEs) instead of flares, is reviewed. The radio signatures of coronal mass ejections are described. The physical processes for the generation of radio bursts and energetic proton streams during the typical event 1991-06-15 CME are discussed in detail, and recent progress in studying the CMEs and associated radio bursts with cooperative observations of ground-based and spaceborne radiospectrograph is presented. Finally, some suggestions for future research works are proposed.

Key words sun—CMEs—radio bursts—shock waves—magnetic reconnection—SEPs