

# 日冕物质抛射研究进展

孔 勇 进      吴 铭 蟾

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

## 摘 要

作为一种大尺度的太阳高能活动现象,日冕物质抛射(CME)的发现令人瞩目,其强烈的行星际和地球物理效应更引起了天文、空间和地球物理学家的共同关注。在本文中介绍了自 CME 发现以来的 22 年中观测和研究所取得的进展,以及它给太阳物理学带来的影响,并分析了研究工作所面临的困难和障碍,展望了 CME 研究的前景。

关键词 太阳:日冕 — 太阳:耀斑 — 太阳:日珥 — 太阳:射电辐射

## 1 前 言

日冕物质抛射(CME)是太阳上高能的活动现象之一。当 CME 发生时,大量物质在数十分钟内被推入行星际空间,同时,日冕大尺度结构发生突然变化。这些抛出物质进入行星际空间后,可以引起行星际激波,能严重干扰和影响太阳风磁场甚至地磁场。

CME 的发现是空间观测技术发展的重要成果。1973 年美国海军实验室的 OSO-7 卫星首先观测到一些突如其来的物质抛射使日冕结构发生了突然变化,这种抛射不仅涉及很高的质量和能量,而且发生频繁,改变了人们以往认为日冕结构比较稳定的看法。该现象立刻引起了研究人员的注意,被称之为“日冕瞬变”(coronal transient)<sup>[1]</sup>。

随后,高山天文台(HAO)安装在 Skylab 上的日冕仪于 1973 年 5 月至 1974 年 2 月间对这种日冕瞬变现象进行了首次常规监测,取得了第一批太阳活动周衰减期的资料。70 年代中后期, P78-1 卫星上的 Solwind 白光日冕仪、SMM 上的偏振日冕仪、夏威夷 MLSO 的 Mark-III 型 K 冕仪及 Helios 飞船的黄道光光度计陆续投入观测,由于各仪器具有不同的视场高度范围,形成了从  $1.2R_{\odot}$ (MLSO) 到十分之几天文单位(Helios)范围内的立体观测。到 1989 年底 SMM 停止观测为止,已获得了跨越一个半太阳周(17 年)、覆盖低日冕到行星际空间的大量瞬变事件的观测资料<sup>[2]</sup>,这些资料是目前认识和主要基础,近年来大量的研究成果都来自对这些观测的分析。

在具体分析 Skylab 和 SMM 的瞬变资料过程中, Munro 和 Hundhausen 等人<sup>[3,4]</sup>提出了“日冕物质抛射”(coronal mass ejection)的概念,将其定义为“在几分钟到几小时的时间尺度内日冕结构发生的明显变化,并伴有可观测的新的亮白光物质出现”。按这个定义在 Skylab

观测中证认出 77 个 CME 事件, SMM(1980 年 3—9 月, 1984—1989 年) 观测到近 1300 次抛射, Solwind(1979—1985 年) 和 Helios(1975—1983 年) 也观测到千余个 CME 事件。Mark-III 型 K 冕仪主要配合 SMM 作低日冕观测, 对研究 CME 的源有重要意义。

20 多年来, CME 观测研究得到了极大的发展, 测得 CME 抛出质量为  $10^{11}$ — $10^{13}$  kg, 能量可达  $10^{23}$ — $10^{25}$  J, 相当于太阳耀斑所释放的能量。抛出物质以平均约  $500\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度进入行星际空间, 常常引起激波和射电爆发, 可能对行星际磁场和太阳风、甚至地磁场造成严重影响, 因此它在日地能量的传输过程中可能具有特殊的重要地位, 是日地能量系统的一个重要环节。近年来, 越来越多的研究者倾向于认为 CME 才是太阳能释放和行星际扰动的初始源, 而被广泛研究了一百多年的太阳耀斑, 可能只是 CME 发生时的次级现象。但是迄今为止, 人们对 CME 的源结构还处于完全无知的阶段, 尽管 MLSO 已将观测延伸到距地球表面  $0.2R_{\odot}$  的低日冕, 但仍然未能观测到 CME 的源。在本文以下几个部分将分别介绍 CME 的观测特征、它与其他太阳活动和日面结构的关系及一些初步的理论模型, 并展望今后工作的前景。

## 2 观测研究结果

观测提供了几个系列大量的 CME 事件, 对这些资料的分析研究主要以两种方式进行, 即单个事件的研究和统计研究。研究单个事件对于认识 CME 本身有重要意义, 它是通过对单个事件进行尽可能完整全面的分析, 寻找其结构或过程的特征, 甚至还可以模拟事件的过程。从这些研究中, 常常可以获得一些重要的论断, 如对 1980 年 8 月 5 日事件的分析发现在抛射区域内  $1.2$ — $2.0R_{\odot}$  之间的日冕抛射足以提供抛射所需的质量, 支持了抛射物质来源于日冕的观点<sup>[5]</sup>。

从单个事件的研究中, 我们可以了解 CME 结构, 并能获得抛射大小、速度、质量和能量等特征参数的值, 而通过大量事件的统计研究则可以了解位置分布、出现频率等一些总体性质, 有助于从总体上把握 CME 活动及演化的规律。并进而研究 CME 与日面结构及其他活动的相关关系, 这些相关结果将在下一节中讨论。

### 2.1 形态结构

类环结构是 Skylab 和 SMM 观测中最常见的一种抛射形态, 它由三部分组成: 平滑的亮外环、暗腔和亮核。外环物质向外运动, 但其足点不随之而发生侧移, 在整个过程中足点基本固定, 所以当抛射达到相当高度时, 物质几乎是足点沿径向抛出(演化为双峰结构); 暗腔是一低密度的抽空区, 其中磁场较强, 腔内的高密度亮核常常是爆发日珥物质, 不过这两部分不是在所有的事件中都会出现。

类环事件在 Skylab 和 SMM 的观测中占有优势(26% 和 80%)<sup>[3,6]</sup>, 但在 Solwind 的观测中却只占 1%, Howard 等人<sup>[7]</sup>仔细分析了 Solwind 观测的 CME 结构, 提出了 10 种结构分类(表 1)。

### 2.2 速度、质量和能量

通过抛射的高度-时间轮廓测出的抛射速度在  $10$ — $2100\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  之间, 平均  $470\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  左右。从不同时期的观测中获得的结果基本一致, 只有 St.Cyr 和 Webb<sup>[8]</sup>指出太阳活动周极小年慢抛射较多, 因而具有相对较低的平均速度。由于大多数 CME 在日冕仪视场范围内观测不

到加速, 因此推测其加速过程应该是在很短的距离(约  $0.2R_{\odot}$ ) 和时间 ( $\leq 10\text{min}$ ) 内完成的, 到达视场高度以后就不再加速<sup>[9]</sup>, 引起这种脉冲加速的原因, 正是 CME 理论研究要寻找的驱动力.

CME 的质量可通过测量辐射强度来计算<sup>[10]</sup>, 对 1979—1981 年 Solwind 观测的抛射事件计算得到质量范围为  $10^{11}$ — $10^{13}\text{kg}$ , 平均质量为  $4.1 \times 10^{12}\text{kg}$ , 并由此计算出抛射的能量范围为  $10^{23}$ — $10^{25}\text{J}$ , 平均动能  $3.5 \times 10^{23}\text{J}$ .

此外, Howard 等人<sup>[7]</sup> 还根据抛射的速度、能量等因素将抛射事件划分为 Y(Yes)、Q(Questionable)、N(No) 三个级别. 其中 Y 是一些重要的确定的事件, 通常具有较高的能量; Q 是不能确定的事件, 可能是由于速度太快或其他的原因而未能得到两次观测像, 因此无法测出其速度, 这一级别中也可能包含相当高能的事件; N 类型是一些较弱的或不重要的事件, 它们的出现比例见表 1.

表 1 SOLWIND 观测 CME 的分类和级别<sup>[7]</sup>

类 型	Y	Q	N	总计 (%)
环	0.5	0.3	0.3	1.1
晕	0.8	0.9	0.3	2.0
曲前沿	10.5	3.5	1.2	15.2
尖 峰	0.0	2.2	19.8	22.0
双 峰	1.1	4.3	6.5	11.9
多 峰	3.4	7.8	7.6	18.8
冕流爆发	2.8	1.7	0.6	5.1
扩散扇形	0.4	3.8	5.8	10.0
复 杂	3.2	1.4	0.5	5.1
其 他	1.3	6.0	1.7	9.0
总计 (%)	24.0	31.9	44.3	100.0

### 2.3 抛射大小及位置分布

CME 是一种大尺度的现象, 它的空间尺度一般在  $10^5\text{km}$  左右, 常用纬度方向的延伸, 即角宽度(或跨度)来描述抛射的大小. 这个宽度可以从几度到几十度, 一般都很大, 平均在  $45^\circ$  左右, 远远大于一个活动区的范围. 而且抛射的大小几乎不受太阳活动周期的影响, 每年抛射大小的分布及平均值均无大的系统变化.

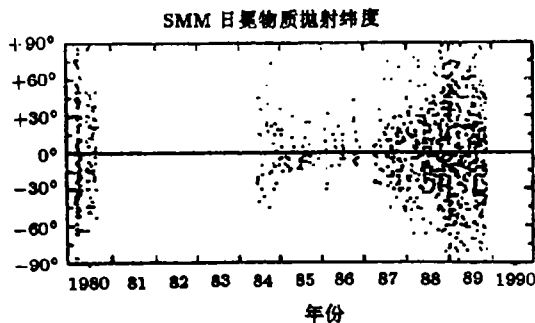


图 1 日冕物质抛射在日面上的分布<sup>[11]</sup>

由于 CME 的范围很大, 故用 CME 中心在日面上的投影纬度即位置角来描述抛射发生的位置, 从位置角的变化分析中, 发现了类似太阳黑子的“蝴蝶图”<sup>[11]</sup>, 但它与黑子的“蝴蝶图”图形正好反相, 即极小年收缩到赤道附近的窄区域内, 以后随着太阳活动的上升向两极扩展, 极大时可达两极, 大致对称于赤道(图 1).

这种位置分布的变化规律与黑子和活动区正好相反, 却与盔状冕流、日珥等日冕的大尺度磁场结构一致, 且有回避大

面积的极冕洞的倾向。

## 2.4 发生频率

CME 是一种发生频繁的现象, 即使在太阳活动极小年亦不断出现, 但由于各仪器观测特性的不同, 使它们之间的观测结果很难进行直接比较<sup>[4,7]</sup>。Webb<sup>[12]</sup> 仔细分析了 17 年的观测结果, 发现其发生率的变化规律与太阳活动周期一致(图 2), 而且与耀斑等其他太阳活动的产生率有良好的线性关系。

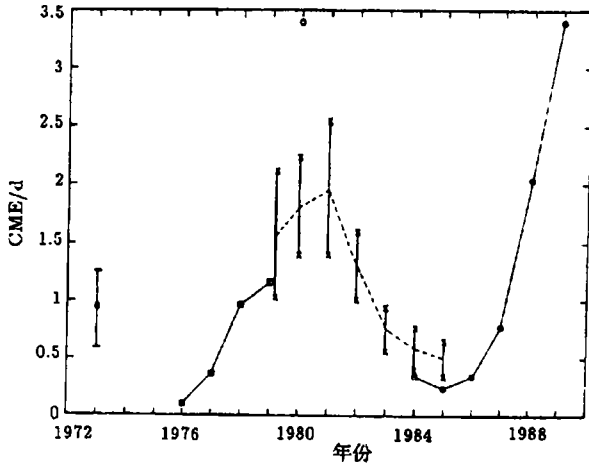


图 2 抛射年平均发生率的变化<sup>[12]</sup>

Skylab ○                      Hellos □  
Solwind ×                      SMM ⊙

## 3 相关日冕结构及其他太阳活动

### 3.1 CME 耀斑和爆发日珥

由于 CME 源直接观测的困难, 寻找相关的活动和结构一直被作为间接了解抛射源的一条重要途径。但统计研究的结果并未产生预期的结论。CME 与耀斑和爆发日珥有如下的统计关系:

- (1) CME 与耀斑的相关程度很低, 但已远远超过随机相关所能达到的程度<sup>[13]</sup>。
- (2) 耀斑的强度对相关程度没有影响, 但耀斑的寿命却是一个重要的因素。与 CME 相关的 X-ray 耀斑中大多为长寿命事件(long-duration event), 而且耀斑持续时间越长, 相关抛射的尺度越大<sup>[3,14,15]</sup>。
- (3) 相关耀斑可出现在 CME 跨度内任何位置, 但绝大部分集中在抛射足附近。
- (4) 大多数(65%) 相关耀斑的爆发晚于 CME, CME 的开始时间比相关的 X-ray 耀斑早 17min 左右<sup>[15]</sup>。
- (5) 约一半左右的抛射伴有 H $\alpha$  活动, 抛射与爆发日珥的关系比耀斑更为密切。
- (6) 与日珥相关和与耀斑相关的事件在结构和性质上没有明显的差异, 它们与完全没有

相关活动的 CME 事件之间也没有严格的界限<sup>[16,17]</sup>。

从以上关系我们可以看出：耀斑不大可能成为 CME 的起因，因为有大量的相关耀斑产生于抛射开始之后。而宁静日珥具有与抛射相当的尺度，爆发日珥与 CME 之间的强相关可能说明它与大尺度磁结构的不稳定性有紧密联系。三者的相关程度表明，其间不存在因果关系，但可能在一定程度上相互影响。

### 3.2 与米波射电爆发的关系

在 Webb 通过产生率所作的最小二乘法线性拟合中，米波 II 型爆发是与 CME 线性相关程度最好的活动类型，研究表明，在所有的 II 型爆发中，60%—80% 与 CME 相关<sup>[18]</sup>。更进一步的分析还提出米波 II 型爆发可能有两种起因，一类与 CME 及行星际激波有关，是由 CME 抛出物质推动日冕等离子体形成的激波引起的（活塞式驱动），另一类则与持续时间很短的耀斑相关，可能是由耀斑脉冲引起的爆震波激发的<sup>[19]</sup>。日冕等离子体的 Alfvén 波速约  $400\text{--}500\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而与 II 型爆发相关的 CME 的速度都在  $400\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  以上，这支持了 CME 引起 II 型爆发的论点。

IV 型爆发也是一种与 CME 密切相关的活动。迄今为止的观测资料显示，几乎所有的 IV 型爆发都伴有 CME，且 IV 型爆发源常常出现在抛射的亮前源之后或沿其边缘<sup>[18,20]</sup>，所以一般认为这种射电爆发现象是由 CME 引起的。观测到与 IV 型爆发有关的抛射速度一般都在  $400\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  以上，但最近发现，速度较低的抛射 ( $200\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 左右同样也可能产生 IV 型爆发。

Jackson<sup>[21]</sup> 曾指出在 CME 开始前平均 6h 左右，距抛射中心  $20^\circ$  的范围内常聚集着许多 III 型射电爆发群，它们可能是日冕物质抛射的先兆活动。一般来说，由快电子产生的 III 型爆发与耀斑的关系比抛射更密切，所以通常是通过它来研究耀斑的结构，不过在其变形 U 型爆发中，有一类可能与抛射有关。这类事件是由快电子沿封闭磁环运动引起的，具有向高空扩展的环结构，其扩展速率与 CME 亮环的运动速度相当，并与 II 型爆发相伴出现。目前这种结构与抛射的关系还未得到证实。

表 2 日冕物质抛射与各类活动的相关统计<sup>[24]</sup>

	Skylab	SMM	SMM
	1973—1974	1980	1984—1986
可测速 CME 总数	40	58	73
CME 平均速度 ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	470	340	237
与各类活动相关的 CME 数	34(85%)	38(66%)	34(47%)
其中：爆发日珥 (EPs)	31(91%)	26(68%)	26(76%)
X-ray 事件	16(47%)	29(76%)	25(74%)
H $\alpha$ 耀斑	13(38%)	14(37%)	9(26%)
射电 II、IV 型爆发	14(38%)	12(32%)	7(21%)

除 III 型爆发群外，还有一些连结不同活动区的巨型软 X 射线弧也被认为可能是 CME 的先兆现象<sup>[22,23]</sup>。Webb<sup>[24]</sup> 对 CME 与各种活动的相关研究作了一个完整的总结，并列出了几个不同时期得到的相关率（见表 2），与各类活动相关的 CME 数后的百分比为相对于有相关的 CME 数而言。

### 3.3 日冕大尺度结构

冕流和冕洞是日冕上两种突出的大尺度结构，由于 CME 现象所涉及的空间范围很大，因此这两种结构引起了研究者的关注。

冕洞是一些低温度低密度的单极磁区, 面积大、寿命长而且变化缓慢。冕洞区域活动较弱, 与日面上的宁静区对应, 一般很少将它与太阳活动相联系。Hewish 和 Bravo<sup>[25,26]</sup> 在研究星际扰动的日面源时曾一度提出冕洞可能是 CME 的源区, 后来 Verma<sup>[27]</sup> 也认为 CME 与冕洞的时空联系比活动区强。这种冕洞可能作为抛射源的观点由于缺乏必要的观测证据而未得到广泛承认<sup>[28,29]</sup>, CME 与低纬冕洞的关系目前还不十分清楚, 但它与极冕洞在位置演化上表现出明显的排斥关系。

冕流是由开放磁力线包围着的闭场, 呈盔状, 其下可覆盖着数个活动区或日珥等较小尺度的结构。从观测形态及演化规律分析, 冕流最可能是 CME 的源, 下列观测事实可以支持这种看法:

(1) 冕流具有与 CME 相当的尺度 (约  $10^5\text{km}$ ), 而且位置分布规律也与 CME 一致;

(2) 冕流结构与 CME 有相似特征 (冕环、冕腔、日珥或活动区), SMM 观测中 75%—80% 的 CME 发生在预先存在冕流的位置<sup>[24]</sup>, 而且确实观测到一类抛射事件直接与冕流活动有关 (冕流爆发事件, streamer blowout)<sup>[7,11]</sup>。

(3) CME 的出现频率与冕流的变化频率一致: 峰年冕流变化最快, CME 发生频繁, 极小年冕流变化不大时, CME 相对较少, 并且集中在两个相对的赤道冕流的位置。

(4) 磁场在扭曲程度较低时, 开场磁能略高于闭场, 所以冕流结构能够稳定存在。但当磁场的扭曲程度增加时, 闭场磁能会迅速超过开场, 导致闭场位形向开场的爆发式转换<sup>[30]</sup>, 说明冕流位形具有产生抛射的可能条件。

## 4 理论研究状况

与观测研究所取得的成就相比, CME 的理论研究进展缓慢, 虽然对一些具体事件进行的数字模拟取得了一定的成功, 但到目前为止, 由于受到源观测条件的限制, 还未找到一个合理的机制来解释日冕物质抛射现象。

观测显示 CME 源的磁场结构可能具有环或拱的位形, MacQueen<sup>[31]</sup> 计算了抛射抽空区域的视向长度, 肯定了 CME 的三维结构。要在这样大尺度的冕拱中引发 CME 有四种可能的过程: (1) 稳定的磁场受到大幅度扰动的作用; (2) 磁场位形从稳定平衡发展为不稳定平衡, 最后在一系列平衡态之间演化; (3) 磁场从稳定平衡位形演化为不平衡位形; (4) 磁场在一系列平衡态之间演化, 使光球上的某种缓变在日冕中发展成为很大的快速变化。

选择上述不同的过程, 发展出了多种不同的模型。早期人们认为 CME 是由耀斑驱动的, 因此多采用由过程 (1) 发展的大幅度扰动模式, 这种机制现在虽已为观测事实所否定, 但其中不乏值得借鉴的观点和方法, 如 Klimchuk 和 Sturrock<sup>[32]</sup> 认为对足点的剪切运动可导致环拱膨胀上升, 不过在他们的分析中, 并未发现环拱失去平衡, Steinolfson<sup>[33]</sup> 后来发展了剪切导致 CME 的模型。过程 (4) 所描述的平衡态间的转换应该是可逆的, 但在实际观测中并未看到有抛射的逆过程即物质注入太阳发生, 所以这个过程也是不可能的, 合理的选择实际只有两种。

即使作了上述初始过程的假设, 求解等离子体方程仍然很困难, 因此不得不作更进一步的简化, 这些简化条件是否合理, 决定了由此而得到的模型是否有效。Low 根据携带对称磁场的等离子体流进入无磁场区域的情形, 最早导出了自相似条件下 CME 的分析解<sup>[34,35]</sup>, 并

指出 CME 可由某种引力不稳定性引起, 这种不稳定性还可能同时引起耀斑等其他形式的太阳活动。他在分析中还发现, 几种不同的磁场位形可以导致相似的观测特征(环、暗腔等), 说明 CME 源可能具有多种磁结构位形。

Priest<sup>[36]</sup>、Wolfson 和 Gould<sup>[37]</sup> 的研究分别提出压力变化和密度增加可驱动 CME, 而章公亮通过对 1980 年 8 月 18 日抛射的演化分析提出 CME 由强磁场膨胀体驱动<sup>[38]</sup>, 除此之外, 还有大量的数字模拟模型给出各种不同的机制。可见在 CME 理论研究中, 最大的困难并不在于找到一种驱动力或模型来解释这种现象, 而在于验证这种驱动力的实际存在或合理性。另外, 求解中的各种简化条件和假设可能严重歪曲事物的本质。如在求解中应用最多的是无力场条件, Low<sup>[39]</sup> 在利用加速过程分析抛射的能量来源时却发现无力场位形的储能不足以提供 CME 所需的能量。正是这种验证的困难使我们面对众多的数字和分析模型却无从选择, 尽管作了大量的研究, 人们对日冕物质抛射源结构及其触发机制的了解还几乎为零。1991 年 Harrison<sup>[40]</sup> 对各种 CME 模型作了综述评论, 认为目前各种模型都涉及过多的简化和假设, 导致了对现象本身的偏离, 为避免求解方程的困难, 他在各种观测特征的基础上, 提出了一个简单的“卡通”模型, 认为活动区磁拱的剪切运动可能导致大尺度磁环的不稳定而产生 CME。这一模型是否合理, 还有待于验证和充实。

## 5 结 束 语

CME 现象发现至今仅 20 余年, 但已形成了相当的研究规模, 目前人们对其主要观测特征已经有了比较统一的认识。CME 爆发的规模大、能量高, 发生频繁且有强烈的行星际和地球物理效应, 这些特点预示着它将在太阳物理中占有重要的一席之地。

CME 是一个复杂的动力学过程, 其特征参数的变化范围很大, 通常可跨越 1 到 2 个量级, 使得目前的动力学理论难以完全解决它的爆发机制, 而 CME 源直接观测的困难, 更严重阻碍了 CME 理论的形成和发展, 使得 CME 至今还没有一个全面合理的理论模型。即将实现的 SOHO 计划可望解决这一难题, 它所携带的三架日冕仪, 可在 CME 发生时将观测的高度范围扩展到从色球至  $30R_{\odot}$ , 在此范围内, 应该能观测到 CME 爆发的源位置和开始时间, 而且这几架仪器可以进行大、小尺度, 开、闭场位形的观测, 与 SOHO 上其他仪器的辐射线测量相配合, 可以进一步了解详细过程和结构, 获得更多关于抛射内部密度、温度和速度结构的信息<sup>[41]</sup>。可以肯定, 对 CME 现象的完全了解, 将对太阳物理研究产生巨大的影响, 并将丰富动力学理论的内容。

## 参 考 文 献

- [1] 张明昌, 萧耐园. 天文学教程. 北京: 高等教育出版社, 1990. 第七章
- [2] Webb D F. In: Bergeron J ed. Reports on Astronomy. IAU XXII A, Dordrecht: Kluwer, 1994: 64
- [3] Munro R H et al. Solar Phys., 1979, 61: 201
- [4] Hundhausen A J et al. J. Geophys. Res., 1984, 89: 2639
- [5] Hildner E et al. In: Kundu M, Woodgate B E eds. Energetic phenomena on the sun. NASA CP-2439, Dordrecht: Kluwer, 1989. Chapter 6
- [6] Wagner W J. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1984, 22: 267
- [7] Howard R A et al. J. Geophys. Res., 1985, 90: 8173
- [8] St. Cyr O C, Webb D F. Solar Phys., 1991, 136: 379

- [9] MaQueen M C, Fish R R. *Solar Phys.*, 1983, 89: 89
- [10] Tandberg-Hanssen E, Esmile A G eds. *The physics of solar flares*. Cambridge: Cambridge Univ. Press., 1988. Chapter 9
- [11] Hundhausen A J et al. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 13317
- [12] Webb D F. *Adv. Space Res.*, 1991, 11(1): 37
- [13] Harrison R A. *Adv. Space Res.*, 1994, 14(4): 23
- [14] Webb D F, Hundhausen A J. *Solar Phys.*, 1987, 108: 383
- [15] Harrison R A. *Adv. Space Res.*, 1991, 11(1): 25
- [16] Anzer U, Pneuman G W. *Solar Phys.*, 1982, 79: 129
- [17] Feyman J, Hundhausen A J. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 8451
- [18] Kahler S W. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1992, 30: 113
- [19] Sheeley N R Jr. et al. *Ap. J.*, 1984, 279: 839
- [20] Robinson R D et al. *Solar Phys.*, 1986, 105: 149
- [21] Jackson B V et al. *Publ. Astron. Soc. Aust.*, 1978, 3: 241
- [22] Rust D M, Hildner E. *Solar Phys.*, 1976, 48: 381
- [23] Harrison R A. *Astron. Astrophys.*, 1986, 162: 283
- [24] Webb D F. In: Svestka Z, Jackson B V, Machado M E eds. *Eruptive solar flares*, Proc. of IAU colloq. No. 133, Iguazu, Argentina, 1991, Berlin: Springer-Verlag, 1992: 234
- [25] Hewish A. *Nature*, 1985, 314: 137
- [26] Hewish A, Bravo S. *Solar Phys.*, 1986, 106: 185
- [27] Verma V K. In: Priest E R, Krishan V eds. *Proc. of IAU symp. No. 142, Bangalore, India, 1989*, Dordrecht: Kluwer, 1990: 450
- [28] Harrison R A. *Solar Phys.*, 1990, 126: 185
- [29] Hewish A. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95: 12301
- [30] 胡文瑞, 杨海寿. *太阳耀斑*. 北京: 科学出版社. 1983: 457
- [31] MacQueen R M. *Solar Phys.*, 1993, 145: 169
- [32] Klimchuk J A, Sturrock P A. *Ap. J.*, 1989, 345: 1034
- [33] Steinolfson R S. In: Winglee R M, Kiplinger A L eds. *Max'91 workshop#3, Boulder: Univ. of Colorado, 1990: 123*
- [34] Low B C. *Ap. J.*, 1982, 254: 796
- [35] Low B C. *Ap. J.*, 1984, 281: 392
- [36] Priest E R. *Ap. J.*, 1988, 328: 848
- [37] Wolfson R L T, Gould S A. *Ap. J.*, 1985, 296: 287
- [38] 章公亮. *空间科学学报*. 1995, 15: 170
- [39] Low B C. *Adv. Space Res.*, 1993, 13(9): 63
- [40] Harrison R A. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. A*, 1991, 4336: 401
- [41] Huber M C E, Malinovsky-Arduini M. *Space Sci. Rev.*, 1992, 61: 301

(责任编辑 刘金铭)

## Progress in the Study on the Solar Coronal Mass Ejection

Kong Yongjin Wu Mingchan

(Yunnan Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

### Abstract

Coronal mass ejection(CME) is one of the most energetic activities on the Sun. A CME can bring a great amount of mass from the Sun into interplanetary space, involving a sudden change



---

in the large scale of coronal structures, and usually making strong effects on interplanetary and geomagnetic fields. Now it is becoming a common focus in solar physics, space science, and geophysics. In this paper, we give a review on progress in CME observational and theoretical researches during the last twenty-two years, and then show the problems in its study and prospect.

**Key words** Sun: corona—Sun: flares—Sun: prominence— Sun: radio radiation