

日冕物质抛射的观测性质

孙 凯

(北京大学地球物理系 北京 100871)

摘 要

综述日冕物质抛射 (CME) 的观测特性。简短的前言之后, 给出 CME 的发现经过及统计特性, 着重介绍 CME 与其他种类太阳活动的相关。然后介绍 CME 的一般特性, 包括可能与 CME 相关的一些物理过程的观测特性。初步结论是: CME 是一种演变中的磁结构 (EMS) 现象。它是与太阳大气中磁结构的扰动相联系的, 这种扰动能够引起稳定性破坏; 如果条件适当, 后者也可导致耀斑或日珥爆发。进一步的观测将能发现 CME 的直接原因。

关键词 太阳: 日冕 — 太阳: 耀斑 — 太阳: 日珥 — 太阳: 暗条 — 太阳: 磁场 — 太阳: 活动 — 太阳: X 射线 — 太阳: 射电辐射

1 前 言

过去的半个世纪曾企图证认那些导致地磁暴和太阳高能质子事件 (SEP) 的太阳耀斑, 并研究其特性。这些广泛的研究, 曾经引起太阳物理学家的极大兴趣。在 20 多年以前由 OSO-7 和 Skylab 空间飞船上的日冕仪观测, 发现了大的日冕爆发^[1,2]。后来这种现象被称作日冕物质抛射 (CME)。CME 能抛射出巨大的等离子体和磁场的相互包含结构, CME 能产生日冕磁结构较大的改变, 产生太阳风高速瞬变流, 且能有效地扰动地球环境。最大的 CME 质量超过 $10^{16}g$, 动能超过最大的一些耀斑的总能量。仅在几个太阳半径高度处, 其体积就膨胀得使太阳显得渺小^[3]。

最初认为 CME 是由太阳耀斑引起的。今天虽然一般仍然认为大耀斑既是日冕中的能量释放又是行星际被扰动的重要原因, 但很多结果已表明: CME 与耀斑之间的关系是复杂的。研究 CME 不但可以深入理解一种尚较陌生的太阳活动现象, 且有利于进一步揭示其他太阳活动现象, 特别是耀斑的本质。

文中着重介绍 20 多年来有关 CME 的观测和统计的研究成果 (必要时顺带提及一些对观测结果所能作出的理论解释、观测研究方法和模型工作, 但不作为重点)。CME 被发现后,

国家自然科学基金资助项目

怀柔太阳光学开放实验室资助项目

1995 年 6 月 1 日收到 1996 年 5 月 3 日收到修改稿

早期研究特别重视它与其他太阳活动的统计关系；文中也专有一节介绍这方面的情况（虽然，有些研究的性质不易完全划分清楚）。第 2 节主要介绍 CME 的发现及其统计规律。第 3 节主要介绍 CME 的一般观测特性，包括可能与 CME 相关的一些物理过程的观测特性。第 4 节给出初步总结与展望。

2 CME 的发现及其统计规律

Skylab 观测到 CME 的第一个总结^[1]毫不怀疑，CME 正是长期寻找的、产生太阳风高速瞬变流的日冕物质爆发，正是这种瞬变流又产生地磁暴。文献 [1,4] 发现，少数 CME 与 H α 耀斑相伴。这些 CME 一般要比没有耀斑相伴的 CME 速度快很多，且这些 CME 几乎总是和 II 型或 IV 型米波射电爆发相伴。这些研究以及文献 [5,6] 报道的关于在 OSO-7 上观测到的与耀斑有关的 CME 研究，均毫不怀疑最快的一些 CME 产生于耀斑爆发相。

在早期，CME 是由与之相关的耀斑的压力推进的概念已成为几种 CME 模型的基础（文献 [7-11]）。这些模型均假设 CME 直接处在相关联耀斑的上空，并且耀斑开始在 CME 开始之前。

1973—1974 年的 Skylab 发射首次提供大批 CME 的资料。这就可能把 CME 与其他太阳现象作比较，以寻找它们之间的空间与时间的关联。Sheeley^[12] 等人研究了在由 Solrad 飞船看到的长寿命（> 4.5h）软 X 射线事件（LDE）期间空间可分辨的 Skylab 观测。该项研究表明所有的 LDE 全有 CME 伴随。大多数 LDE 伴之以暗条爆发。Pallavicini 等人^[13] 考察 Skylab 资料中的边缘 X 射线耀斑像，且作结论：所有的耀斑是由两类组成。第一类是具有小体积（ 10^{26} — 10^{27} cm³）、低高度（< 10^4 km），和短寿命（数十分钟）的致密耀斑。第二类是由大体积（ 10^{28} — 10^{29} cm³）、巨大高度（> 10^4 km）和长寿命（数小时）的耀斑构成的。第二类与 CME 有很好的关联，第一类没有。这些结果暗示，当 CME 与耀斑关联时，那些耀斑就有 LDE。Sheeley, Pallavicini, Kahler 等人^[12-14] 没有提到 CME 可以不与耀斑相关联。

Munro 等人^[15] 最早而广泛地观察了 CME 与各种形式的太阳活动的关联。在那些有关联的 CME 中，大约 40% 与耀斑相关联，但多于 70% 与爆发日珥或暗条消失相关联。对于 1980 年在 SMM 飞船上观测到的 CME，Webb 等人^[16] 得到一个类似的结果。应用 Skylab 资料分析和在 LDE 耀斑中存在重联的模型^[17,18] 推论出一种观念，耀斑包括一类不与 CME 相关联的有限而致密的短寿命耀斑和另一类由开放磁场的重联引起的与 CME 相关联和长寿命的耀斑^[19]。Sheeley 等人^[20] 考察了与 Solwind 日冕仪观测到的 CME 相关联的软 X 射线爆发的寿命，发现 X 射线事件的寿命越长，它与 CME 相关联的可能性就越大。这些可能性从最短寿命（~1h）的 26% 到最长寿命（> 6h）的 100%。在与 CME 联系方式方面短寿命和长寿命 X 射线爆发之间没有明显的差别。后来，在对于 Solwind CME 资料^[21] 和对于 SMM CME 资料^[22] 的研究中看出，与 CME 相关联的 X 射线耀斑的寿命分布在广阔范围内。

Munro, Webb 等人^[15,16] 的统计研究得到与文献 [2] 相同的结果：大多数 CME 没有 H α 或 X 射线耀斑相伴随。但 Munro^[15] 还指出，最大的一些耀斑常与 CME 相关联。Harrison^[23] 第一个把 X 射线耀斑的详细位置和时间联系到相关联的 CME。Harrison^[23] 在对 48 个耀斑/CME 事件的统计分析中发现，耀斑趋于处在 CME 的一个足的下面，而不是处在 CME 的中心之下。在 SMM CME 的一些更近的研究中，Harrison 等人^[22,24] 发现，更可认为耀斑可能

处在 CME 之下任何位置。这是与文献 [21] 采用 Solwind 的 CME 所得到的结果相类似的。Kahler, Harrison 等人 [21,24,25] 曾指出: CME 的特征角大小, 超过相关联耀斑和活动区的角大小 3—10 倍。Kahler 等人 [26] 在对于 4 个耀斑和与其相关联的暗条爆发事例的详细研究中发现, 在耀斑脉冲相发亮的 $H\alpha$ 区域要比爆发暗条的整个长度小很多。概括地说, 耀斑区域要小得多, 且通常不在 CME 之下的中心区域。

MacQueen 等人 [27] 考察了用 Mauna Loa 天文台 K- 冕仪观测到的 12 个内冕 (1.2—2.4 R_{\odot})CME 的运动学特性。当画出径向速度作为到日心距离的函数的图时, 发现了与耀斑和与日珥相关联的 CME 之间的差别。与耀斑相关联的 CME 一般有较高的速度, 且在日冕仪视场中未发现它们加速的证据; 而与日珥相关联的 CME 较慢, 且显现出实质性的加速。虽然这一点可能被取为耀斑驱动 CME 的证据, 但在两种 CME 的区分方面仍然有某种不确定性, 应该把这种研究继续作下去。

当把 SMM CME 边界的位置和轮廓绘到一张综合图上; 又独立地将在磁场的极性方面展示重要的大尺度变化的 $H\alpha$ 综合图上的各个区域确定下来, 并与 CME 综合图比较 (文献 [3] 及该处所引文献) 就发现, 2/3 以上的 CME 和 $H\alpha$ 综合图上的区域重叠。大多数 CME 与大尺度、发展着的表面活动区相关联。CME 的位置也与显现冕流的综合图作了比较。在 1984 年期间, 50 个 CME 中的 38 个与冕流相关联, 其中 80% 的冕流在 CME 期间被瓦解或被抛出。一般而言, 行星际激波的估计能量可达到 10^{32} erg 以上, 比大耀斑的能量大到近 10 倍 [28—30]。虽然, 大耀斑的能量也可达到约 10^{32} erg。在 Cane, Heras, Sanahuja 等人 [31—33] 讨论的 14 个事例中, 行星际激波和 SEP 事件产生于活动区之外的暗条的爆发。尽管没有相伴耀斑, 这些表面上看起来温和的太阳事件导致十分高能行星际现象, 包括一例能量 $E > 50$ MeV 的质子事件 [34]。这些研究已表明, 耀斑能量与相关联的 CME 或行星际 SEP 的能量的相关是不足道的。

Hundhausen [35] 还发现, 在 1987—1989 年太阳活动上升期 CME 出现的纬度跟随盔状冕流纬度变化, 而不是跟随黑子、活动区或耀斑出现的纬度变化。再加上在此期间 CME 的宽度和速度没有显现出随纬度的变化, 这表明, 处在活动区纬度, 且可能和耀斑相关联的 CME 与那些和高纬暗条爆发相关联的 CME 没有质的差别。这样一来, 与较早文献 [27] 的结果的含义相反, 这些后面的研究并不支持下列概念: 相关联耀斑的出现对于 CME 的特性具有某种影响。

长期以来就知道 [36] 在暗条本身爆发之前暗条活动呈现性质不同的阶段。因为对于很多 CME, 爆发暗条显现亮核 [16], 爆发前的暗条活动提供一种 CME 前兆信号。文献 [23,37] 发现, 靠近 CME 射出的开始时间和在几个相关联耀斑的开始之前约 20min 时软 X 射线辐射增强的证据。在对 16 个与耀斑有关联的 CME 的近期研究中, Harrison 等人 [24] 发现在大多数耀斑之前一些 X 射线辐射增强, 但对于许多这种观测缺少位置信息。Tappin [38] 也发现, 用 SMM 飞船上的硬 X 射线成像光谱仪 (HXIS) 设备观测到几乎所有 X 射线耀斑均有弱的软 X 射线爆发为其前导。这样, 可以认为有一种迹象, 弱的软 X 射线发射可能是在 CME 开始时发生的。但这一结果有待于验证。

与耀斑相关联的 CME 的角大小, 要比耀斑后环状日珥体系 (LPS) 的角大小大得多, 后者仅在耀斑所在的活动区中观测到。或许重联出现在与 CME 相关联的全部开场区, 而 LPS 仅在场足够强且重联有足够的能量以产生可观测的环处被看到 [39]。

Cliver, Kusugi 等人^[40,41]已发现一种特殊类型的耀斑后事件：缓慢硬 X 射线爆发。这些爆发与 CME 和大耀斑关系密切。它们不迟于 5--60min 继 CME 的出现而发生，是以能量 $E > 30\text{keV}$ 的 X 射线谱的硬化和微波对硬 X 射线通量的高比率为其特征的。它们与 IV 型或连续谱射电爆发有强关联，并被解释为电子在 CME 之后的 LPS 中被加速和俘获^[40]。这种爆发出现在耀斑的晚期，并不伴随 $\text{H}\alpha$ 耀斑的亮度或面积的大变化。

另一类日冕结构，被称作巨拱，是由 Svestka^[42] 在 SMM HXIS 的像中发现的。这些大 ($> 10^5 \text{ km}$) 的结构处在活动区之上且似乎与双带耀斑相关联地发亮。因为巨拱似乎是准稳和长寿命的，难以理解为什么它们能够与涉及 CME 的耀斑相关联^[43]。

3 CME 的一般观测特性

前节主要介绍了 CME 与其他种种太阳活动的统计关系。此节继续介绍 CME 的其他观测特性，包括可能与 CME 相关的一些物理过程的观测特性。

用日冕仪观测，内冕被遮住。而一般认为，CME 恰是在那里形成的。为要找到 CME 离开太阳的时间，需要 CME 的高度作为时间的函数的图，然后在时间坐标上反向外推，发现其轨迹，以推算 CME 从太阳边缘离开的时间。以这一时间与相关联的耀斑开始时间作比较，能够表明 CME 开始是在耀斑之前还是在其后。Harrison 等人^[22-24,37]对 SMM CME 所作的研究得到一致的结论：CME 开始常在所关联的 X 射线耀斑开始之前。

如果实质性的加速在 CME 发展过程中出现得早，它仅能在靠近太阳边缘处被观测到。在 Mauna Loa 天文台地面上的 K-冕仪提供了从日心量起 $1.2-2.0 R_{\odot}$ 处的 CME 观测。它在 SMM 期间进行了观测。通过联合 Mauna Loa 和 SMM 观测允许对某些 CME 的轨迹由 $1.2-5 R_{\odot}$ 追踪。从 1988—1989 年大量观测中发现很多 CME 其起爆或是在 Mauna Loa 或是在 SMM 设备的视场中被直接观测到。这种事件的开始时间能被确定到只有几到十分钟的不确定性，无需对观测轨迹作外推。这些研究又一次发现 CME 开始趋于在相关联的硬或软 X 射线辐射增强开始之前出现。(文献 [44] 及其所引文献)。

很多最大能量的 CME 实际上涉及一个业已存在的冕流扰动，在冕流作为 CME 爆发之前数天之内它增加了亮度和大小。然后，当冕流和 CME 过去之后，在白光综合图上呈现出一个‘号角’ (bugle) 状结构(文献 [3] 及其所引文献)。

这一冕流的隆起对于 CME 和爆发日珥 (EP) 的起因提供了一条重要线索。这种隆起典型地在 CME 出现之前数天开始。

在后来的一项研究中，曾寻找与号角出现有关的因素，可是，发现 CME 和号角不能直接在 $\text{H}\alpha$ 像表面特征中检测到。这给研究带来了困难。但因为 CME 经常与暗条爆发相关联，可以首先寻找与有号角的 CME 在时间上较接近的暗条爆发来利用 $\text{H}\alpha$ 像研究 CME 和号角。在 1984—1986 年三个西边缘号角事件之前 4 天或更多天的时间区间内，考察大熊湖太阳天文台的全日面 $\text{H}\alpha$ 像；在每一情况下均找出可能的爆发暗条；也找出与爆发暗条时间上接近的 CME 所在象限内的新活动区，观察其状态。例如，在 1985 年 6 月 12 日明显与西南方向 CME 有关的唯一表面特征是三个成为一团的活动区。其中两个在衰退过程中，而最西边的一个包括一个长暗条。在号角和 CME 出现的那一天，在两个衰退的活动区之间发展起来一个新的活动区^[45]。在此区域另外一个暗条发展起来。而这两个暗条都被推论为爆发过。可

是,也曾有观测表明磁通量浮现对于暗条爆发和隐含着的 CME 不是必要条件。在 1980 年 6 月 25 日的一例中,一个活动区暗条爆发并连同一个相关联的 1B/4M 级耀斑发生在磁通量肯定没有浮现的时候^[46]。事实上,在包含暗条的双极区中部的小黑子停止其连续上涌一天之后,暗条的稳定性遭到破坏。这些研究结果是很初步的。

Rompolt^[47]曾讨论过一个当今流行的概念,日珥爆发与相关联的 CME 有共同的原因:巨大磁系统(HMS)爆发。HMS 是关联到磁场反转线的磁力线系统。在宁静日珥之上可能有大得多的盔状冕流系统。这一系统被 EP 系统拉长和扩张,而且两系统磁力线之间将重联,并导致整个磁位形的简化或整个磁系统的爆发。

在高导电的日冕中,日珥等离子体和周围的日冕物质沿磁力线运动,只在一些磁力线处包含有等离子体,这些磁力线可以显现出来。当 HMS 爆发时磁结构托起了冻结在其中的日珥和日冕物质。冕流稳定性的破坏可以在数天内出现,并且恰在处于下面的日珥变得活动之前开始。在 EP 开始时,某些物质下流到光球。当系统升起时,日珥物质继续下流,直到两个系统以增加着的加速度爆发^[48]。特别是当慢日珥爆发时,原始物质的一大部分下流到光球。物质的总量、速度、轨迹与物质在爆发拱中的位置、大尺度拱的形状和日珥精细结构被扭转的程度有关。

曾主要通过向外面运动着的电子对光球光的 Thomson 散射来研究 CME。可是也能够通过发射线观测到较低高度的日冕(如文献[49])。大部分这样的‘发射线瞬变’已被 Sacramento 峰天文台绿线和红线光度计记录到。现在,一个新的研究日冕线总强度短期变化的光电光度计已在斯洛伐克的 Lomnický štít 被研制出来(测量的有效时间为 0.64s)^[50]。

Kahler^[14]研究了 LDE 的 X 射线结构且发现它们由高(10^5 km)环状拱构成。文中主张它们是 H α 耀斑后环状日珥系统的 X 射线类似物。日本阳光卫星(Yohkoh)于 1991 年 8 月发射后,已连续发送回极好的日冕资料。软 X 射线望远镜(SXT)提供了许多关于日面上爆发暗条和边缘处 EP 的观测。如果典型的此类事件产生长寿 X 射线环拱,日冕 SXT 像的分析结果应和 CME 有密切的关系。不幸的是,那时没有轨道日冕仪可用,以资直接比较白光 CME 和阳光卫星观测到的事件。在搜寻与 CME 开始相关联的大 X 射线拱的爆发过程中, Klimchuk 等人^[51]证认了 29 个在 Mauna Loa 观测时间内出现的、全日面 SXT 像上的边缘爆发事件;找到了与 CME 起爆相一致的 X 射线结构的速度、宽度和出现率。可是, Mauna Loa 资料尚未经普查以发现是否 CME 真的与这些事件同时出现。

Klimchuk 等人^[51]谈到的一些爆发结构可以与 Uchida 等人^[52]检测到的普遍存在着的活动区上空日冕的膨胀联系起来。这些膨胀在边缘处具有大约为 $10\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度。这一膨胀是慢的、稳态形式的日冕物质损失,它可能对低速太阳风的能量输入起重要作用。

Shibata 等人^[53]也报告了用 SXT 观测到的 X 射线“喷流”。这些喷流很长,准直运动具有瞬时的增强。它们与闪亮的 X 射线亮点、磁通量浮现区和 H α 日浪相关联。

涉及物质抛射的典型事件具有长寿,或者是具有数十分钟到数小时的‘缓变’相。在这种事件中高温等离子体和高能非热粒子可能持续到或出现在任何脉冲相之后很长时间。这些均被增高着的环拱顶上的热 X 射线等离子体、硬 X 射线‘巨’拱、具有逐渐硬化的谱的 X 射线爆发、IV 型射电爆发和 I 型噪暴所证实(如文献[40])。Webb 等人^[3]及其所引文献报告了甚至连 γ 射线发射均能够很好地延续到主相的最新证据。引起这一发射的高能粒子的出现,必然关系到长期的俘获和储存,在延续的力线重联过程中的加速,或两种过程的结合。

可是，因为长时间俘获高能粒子是困难的，也因为观测资料常显示出在事件后期再供能（即加速）的证据，重联过程模型通常更受到支持。

II 型米波射电爆发被解释为从日冕激波中来的等离子体发射。一些研究^[54-57]表明，全部 II 型爆发的 60% 到 80% 以上与 CME 相关联。并且 II 型爆发与暗条和冕流的位置相关联，而不是与耀斑的位置相关联^[58]。II 型激波和 CME 之间的关联仍然是不清楚的。

III 型射电爆发可以表明快电子（速度 $v \sim 0.15c$ ）的日冕径迹^[59]。由于电子由日冕磁场所引导，它们的存在可能提供了一个在 CME 和耀斑开始期间日冕条件的特征。Leblanc 等人^[60,61]发现大多数的 II 型爆发是与 U 型爆发相关联的，U 型爆发是沿封闭磁环的电子流引起的一种 III 型爆发。当 U 型爆发和 II 型爆发相伴随时，相继的 U 型爆发的折转频率向较低方向漂移，这暗示环正在向较高高度膨胀。因为这一膨胀的速率与 CME 的特征速度相类似，Leblanc 等人^[61]把这些膨胀环解释作 CME 的表现形式。

IV 型米波射电爆发由宽带发射所组成，通常仅连同 II 型发射一起被观测到^[62]。IV 型爆发的两个主要类别是移动 IV 型爆发和稳定 IV 型爆发。后者有时被称作噪暴连续区^[63]。CME 可能是稳定 IV 型爆发出现的一个必要条件^[55,64]。其他的观测^[65]也发现了在 CME 的底部亮结构中的 IV 型爆发。一个似乎合理的解释^[66]是：引起爆发的高能电子是在随着 CME 而新形成的冕流中的中性片处，在磁重联期间产生的。

Robinson 等人^[55]发现，全部速度 $v > 400\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 CME 近半数有 IV 型暴源，后者就在 CME 的前导边缘之后。因为移动 IV 型爆发和 CME 均有通过日冕的外向运动，可以预期，在它们之间有某些关联。Gergely^[67]应用一些假设作出结论：移动 IV 型爆发的平均速度小于相关联的 CME 的平均速度，且爆发区移动在 CME 前导边缘之后或随着前导边缘。多频射电日像仪观测已显示出移动 IV 型爆发被限制在 CME 的环或小斑点中^[68,69]。但是否全部移动 IV 型爆发均与 CME 相关联这一点还不清楚^[67]。

4 初步总结与展望

总结以上所述各项研究成果，可以作出下列初步结论与展望。

(1) 20 余年来，用空间和地面上的各种手段所进行的观测表明，CME 是巨大的、突发性的物质抛射事件。所抛射出的物质总量可达 10^{13}kg ，所抛射出的物质团可达数十万千米，在上升数个太阳半径后，物质团可膨胀得使太阳显得渺小。可在数十分钟内释放 10^{25}J 的能量。一般而言，抛射物的最外部分是具有明确边界的膨胀着的环状结构。在这个环的后面是一个爆发过的上升着的日珥。环与日珥之间是密度极小的冕穴。环、冕穴及日珥被称作三部分结构，但有的 CME 不这样典型。

CME 和耀斑的最早显示是 X 射线前兆，后者的结构肯定比耀斑涉及的范围大得多^[70]。

可能，CME 的真实原因不是大耀斑，也不是日珥爆发^[25]。对于日珥^[71]，CME 在其爆发以前形成，且日珥的速度比 CME 前导边缘的速度要小；对于耀斑^[23]，CME 在其开始之前数十分钟开始；且从色球抛射出的物质比 CME 的前沿要慢^[25]。可能，CME 是一种演变中的磁结构 (EMS) 现象。CME 既不是耀斑或日珥爆发的直接原因也不是其直接结果^[72]。

(2) 许多问题还需要进一步的观测来作出回答。这些问题主要有：

(a) CME 爆发的细致的全过程如何？当时低日冕的状态如何？特别要注意 CME 开始的

最早期。

(b) CME 与其他太阳活动特别是日珥、冕流、 $H\alpha$ 耀斑、X 射线爆发和射电爆发等的复杂关系如何？

(c) 观测结果应该帮助解决：是需要建立耀斑和 CME 的统一模型？还是应该分别建立耀斑以及 CME 的模型？

以上问题的解决将能进一步揭示 CME 现象的本质，并增强对于行星际空间和地球环境有巨大影响的事件的预报能力。

(3) 以上给出的许多研究成果，是由多波段观测得来；今后，为获得更深入一步的研究成果，多波段同时观测和其结果的综合分析仍是很重要的。搭载在卫星或其他种类飞行器上的日冕仪的白光观测和 X 射线成像观测，具有特别重要的意义。地面上的日冕、日珥和各种类型的射电爆发的经常监视观测也是不可少的。

进一步的观测将能发现 CME 的直接原因。

致谢 章振大教授对本文提出过许多宝贵意见，作者对此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] Tousey R. In: Rycroft M J *et al* eds. *Space Research XIII*, Berlin: Akademik-Verlag, 1973, 173
- [2] Gosling J T *et al*. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79: 4581
- [3] Webb D F *et al*. *Solar Phys.*, 1994, 153: 73
- [4] Gosling J T *et al*. *Solar Phys.*, 1976, 48: 389
- [5] Stewart R T *et al*. *Solar Phys.*, 1974, 36: 203
- [6] Stewart R T *et al*. *Solar Phys.*, 1974, 36: 219
- [7] Dryer M. *Space Sci. Rev.*, 1982, 33: 233
- [8] Wu S T *et al*. *Solar Phys.*, 1983, 85: 351
- [9] Sime D G *et al*. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89: 2113
- [10] Sime D G *et al*. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90: 563
- [11] Dryer M *et al*. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90: 559
- [12] Sheeley N R Jr *et al*. *Solar Phys.*, 1975, 45: 377
- [13] Pallavicini R *et al*. *Ap. J.*, 1977, 216: 108
- [14] Kahler S. *Ap. J.*, 1977, 214: 891
- [15] Munro R H *et al*. *Solar Phys.*, 1979, 61: 201
- [16] Webb D F *et al*. *Solar Phys.*, 1987, 108: 383
- [17] Kopp R A *et al*. *Solar Phys.*, 1976, 50: 85
- [18] Anzer U *et al*. *Solar Phys.*, 1982, 79: 129
- [19] Svestka Z. In: Neidig D F ed. *The lower atmospheres of solar flares*, Sunspot, NM: NSO, 1986, 332
- [20] Sheeley N R Jr *et al*. *Ap. J.*, 1983, 272: 349
- [21] Kahler S W *et al*. *Ap. J.*, 1989, 344: 1026
- [22] Harrison R A. *Adv. Space Res.*, 1991, 11(1): 25
- [23] Harrison R A. *Astron. Astrophys.*, 1986, 162: 283
- [24] Harrison R A *et al*. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95: 917
- [25] Hundhausen A J. In: Pizzo V J *et al* eds. *Proceedings of the sixth international solar wind conference*. Estes Park, CO, USA, 1987, NCAR Technical Note, 1988, 181
- [26] Kahler S W *et al*. *Ap. J.*, 1988, 328: 824
- [27] MacQueen R M *et al*. *Solar Phys.*, 1983, 89: 89
- [28] Hundhausen A J *et al*. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74: 2908
- [29] Hundhausen A J. *Coronal expansion and solar wind*. New York: Springer-Verlag, 1972

- [30] Lin R P. *Solar Phys.*, 1976, 50: 153
- [31] Cane H V *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1986, 91: 13321.
- [32] Heras A M. *Astron. Astrophys.*, 1988, 197: 297
- [33] Sanahuja B *et al.* *Solar Phys.*, 1991, 134: 379
- [34] Kahler S W *et al.* *Ap. J.*, 1986, 302: 504
- [35] Hundhausen A J. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 13177
- [36] Martin S F *et al.* In: McIntoch P S *et al* eds. *Solar activity observations and predictions.* Massachusetts. The Massachusetts Institute of Techology, 1972. 371
- [37] Harrison R A *et al.* *Solar Phys.*, 1985, 97: 387
- [38] Tappin S J. *Astron. Astrophys. Suppl.* 1991, 87: 277
- [39] Cargill P J *et al.* *Solar Phys.*, 1982, 76: 357
- [40] Cliver E W *et al.* *Ap. J.*, 1986, 305 : 920
- [41] Kusugi T *et al.* *Ap. J.*, 1988, 324: 1118
- [42] Svestka Z. *Space Sci. Rev.*, 1983, 35 : 259
- [43] Svestka Z F *et al.* *Solar Phys.*, 1989, 122: 131
- [44] Kahler S W. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1992, 30: 113
- [45] Martin S F. *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 1990, 61: 293
- [46] Kundu M R *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1985, 57: 621
- [47] Rompolt B. *Adv. Space Res.*, 1984, 4(7) : 357
- [48] Rompolt B. *Hvaa Obs. Bull.*, 1990, 14 : 37
- [49] Wagner W J. In: Altrrock R C ed. *Solar and stellar coronal structure and dynamics, Sunspot, NM: NSO, 1988. 473*
- [50] Minarovjeh M *et al.* *Solar Phys.*, 1992, 140: 1
- [51] Klimchuk A J *et al.* In: Uchida Y *et al* eds. *X-ray solar physics from Yohkoh, International symposium on the Yohkoh scientific results: Sagamihara (Japan) 1993, Kokyo (Japan) Universal Academy Press, 1994, 181*
- [52] Uchida Y *et al.* *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1992, 44: L155
- [53] Shibata K *et al.* *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1992, 44: L173
- [54] Sheeley N R Jr *et al.* *Ap. J.*, 1984, 279: 839
- [55] Robinson R D *et al.* *Solar Phys.* , 1986, 105: 149
- [56] Kahler S *et al.* *Solar Phys.*, 1984, 93: 133
- [57] Sawyer C. *Solar Phys.*, 1985, 98: 369
- [58] Stewart R T. *Solar Phys.*, 1984, 94: 379
- [59] Dulk G A. *Solar Phys.*, 1990, 130: 139
- [60] Leblanc Y *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1983, 123: 307
- [61] Leblanc Y *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1985, 143: 365
- [62] Cane H V *et al.* *Ap.J.*, 1988, 325: 901
- [63] Pick M. *Solar Phys.*, 1986, 104: 19
- [64] Cane H V *et al.* *Ap. J.*, 1988, 325: 895
- [65] Kerdraon A *et al.* *Ap. J.*, 1983, 265: L19
- [66] Cliver E W. *Solar Phys.*, 1983, 84: 347
- [67] Gergely T E. *Solar Phys.*. 1986, 104: 175
- [68] Kundu M *et al.* *Ap. J.*, 1989, 347: 505
- [69] Gopalswamy N *et al.* *Solar Phys.*, 1990, 128: 377
- [70] Harrison R A. In: Schmieder B *et al* eds. *Dynamics of solar flares, flares 22 workshop, Chantilly, France, 1990 Paris: Observatoire de Paris, 1991: 165*
- [71] Fisher R *et al.* *Ap.J.*, 1981, 246: L161
- [72] Feynman J *et al.* *J. Geophys. Res.* 1994, 99: 8451

Observational Properties of the Coronal Mass Ejection

Sun Kai

(Geophysics Department, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

In this paper the observational properties of the coronal mass ejection(CME) are summarized. After a brief introduction, the discovery and the statistic properties of CMEs are given, with an emphasis on the correlations of CMEs to other kinds of solar activity. Afterwards, their general properties are given, including the observational properties of some physical processes which are possibly relevant to CMEs. A preliminary conclusion is: CMEs are phenomena of evolving magnetic structures(EMSs). CMEs may be associated with disturbance in the magnetic structure in the solar atmosphere which can lead to a destabilization. The disturbance may also induce flares or prominence eruptions if the conditions are right for such an event. Further observation will be able to find the direct cause of CME.

Key words Sun: corona—Sun: flares—Sun: prominences—Sun: filaments—Sun: magnetic fields—Sun: X-rays—Sun: radio radiations