第 21 卷 第 1 期 天 文 学 进 展 Vol.21, No.1
2003 年 3 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Mar., 2003

日冕物质抛射和太阳表面磁活动的关系

周桂萍 [1,2] 曹卓良 [1] 汪景琇 [2]

(1. 安徽大学物理系 合肥 230039)
(2. 中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要

综述了近年来日冕物质抛射与耀斑、日珥、冕流和日冕暗化相关关系的研究进展，指出了这些相关关系上的一些不确定因素。同时，介绍了我们所做的部分工作，探讨了不同尺度磁活动之间的物理联系，并提出今后需要进一步解决的问题。

关 键 词 太阳系 — 日冕物质抛射 — 综述 — 太阳表面磁活动

分 类 号 P182.62, P182.7

1 引 言

日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejections, CMEs) 是尺度最大、最壮观的太阳活动现象。它从太阳低层抛射到太阳风层，是一种由等离子体和磁场组成的大尺度结构，也是空间灾害天气最主要的驱动源。对日冕物质抛射物理机制的理解已成为天文学中一个重大挑战性问题 [1] 。近年来，日冕物质抛射研究已成为空间科学中的一个单独分支，对它的理解有了很大进展，但其源区仍缺少直接有效的观测。

日冕物质抛射经常被观测到和其它日面活动相伴生。这种现象引导了人们以这种相关性为基础，研究日冕物质抛射的源区及其形成的物理机制。最近，王水等人 [2] 已对 CME 作了详细的评述；宋丽敏等人 [3] 也专门就一类特殊的 CMEs —— 对地日 CME 进行了综述和讨论。然而关于 CME 与太阳表面磁活动的关系还没有被详细评述过。与耀斑和暗条相比， CME 对天文学家们来说可能是一个新的领域。作为一种天文现象， CME 刚刚开始在其它天体中被发现 [4] 。由于观测中它常常与有些现象如太阳耀斑和太阳暗条爆发相联系，因此天文学家们很敏锐地把这两类不同尺度的活动现象联系起来研究，力图找出它们之间的共性、区别和相互联系，并由此了解 CME 发生的全部过程。可以说， CME 的每一阶段的研究，都伴随着其与太阳表面磁活动现象相互关系的研究。

特约稿 2002-06-28 收到 2002-10-25 收到修定稿

CME 的研究可分为太阳和日球天文台 (Solar and Heliospheric Observatory, SOHO) 发射前、发射后两个阶段。

在 SOHO 发射前， Skylab 卫星首先提供了大量有关 CME 的数据，这些数据是 CME 和其它太阳活动现象在时间和空间上联系的基础。 Munro 等人 [5] 首次利用 1973~1974 年期间 Skylab 卫星观测到的 77 个中日冕 CME 数据进行研究，发现 75% 的 CME 和爆发日珥、 Hα 耀斑、 X 射线事件，以及Ⅱ型暴和Ⅳ型暴有很好的联系。在这些 CME 中， 40% 和耀斑有关， 50% 和暗条爆发相关 (没有耀斑) 。如果只考虑有耀斑和无耀斑时的爆发日珥，则 70% 的 CME 和爆发日珥相关。 Webb 和 Hundhausen [6] 也发现在太阳极大年 —1980 年， Solar Maximum Mission (SMM) 卫星记录到的 CME 中有 2/3 的 CME 都与上述的太阳活动有很密切的联系。此外，大部分与 CME 相关的软 X 射线事件的寿命相当长，与爆发日珥相关的 CME 的数量可能是和 Hα 耀斑或米波射电爆发相关的 CME 的 2 倍多。 Harrison [7] 和 Cyr 等人 [8] 用 SMM 1984~1986 年太阳极小年数据作了同样的统计研究，得到了类似的结果。但他们得到的具有此相关性的 CME 所占的比例相对 Munro 等人的结果要低一些，这可能和某一期间 CME 的平均速度较低有关 [8,9] 。

SOHO 卫星的发射确保了对太阳每天 24 小时无间断的观测，安装在其上的大视角分光日冕仪 (LASCO) 和远紫外望远镜 (EIT) 在观测的时间覆盖、空间范围和时空分辨率上均是前所未有的。 Yohkoh (阳光Ⅱ星) 的软 X 射线望远镜 (Soft X-ray Telescope, SXT) 也比以前的空间 X 射线望远镜具有更高的时间分辨率及更好的观测连续性。 LASCO 、 SXT 和 EIT 分别对高温和低温日冕进行观测，为研究 CME 的起源提供了空前的机会 [10] 。虽然每年 CME 发生的频率和所有与其相关的太阳活动都随太阳活动周的变化而变化，但由于 SOHO 和 Yohkoh 卫星的成功观测，使得对 CME 初发过程的观测和研究成为可能，而以此为基础的其它相关研究也比以往任何时刻都更可靠。

全文评述了 CME 和太阳表面活动的相关研究。第二部分介绍了 CME 的发现与观测；第三部分指出了 CME 相关性研究的重要性和物理思路，评述了 CME 和其它太阳表面磁活动的关系，其中包括与耀斑、日珥爆发、冕流以及日冕暗化的关系。最后，围绕第三部分的内容作了些简单的讨论，介绍了我们正在做的工作，并提出关于 CME 需要进一步研究的问题。

2 日冕物质抛射的发现与观测

1971 年 12 月 14 日， OSO-7 卫星上的 NRL 摄像仪第一次探测到 CME 。当时看起来像几片明亮的白云带着另一片分散的云迅速地从太阳上被抛射出来。这次 CME 发生在太阳边缘的东南方向，位置角约为 100° ，速度为 1000 $km \cdot s^{-1}$ 。在此之前的 02:40 UT ，有剧烈的米波Ⅱ型和Ⅳ型爆发。 Brueckner [11] 估算出这次 CME 的质量为 4×10^{16} g ，能量约为 1×10^{25} J 。由于缺少 Hα 或软 X 射线的观测，很难说这次 CME 是否是由日面东 25° 发生的耀斑事件引起的 [11~13] 。但这一 CME 源区极有可能发生在可见日面上，不能排除它与日面 S21E22 处的暗条消失有关，此暗条的消失发生在 CME 爆发的 12 h 范围内 [14] 。由于缺少进一步研究的观测资料，很难确定此次 CME 是否真的与这些日面活动相关。

对 CME 最好的观测，是通过日冕仪利用白光汤姆孙散射在太阳边缘进行观测。为了观

测到细微的日冕结构，日冕仪的遮光板必须挡住光球层和 1.5 $R_\odot$ 内明亮的日冕层。因此，用这种方法观测 CME ，也就不能判断哪个是 CME 从太阳表面初发的过程。研究 CME 的数据主要来自 4 个安置在空间飞行器上的日冕仪。第一个是 1973~1974 年 Skylab 高纬度日冕仪 (HAO) ，它曾成功地记录到近 100 个 CME ；第二个是美国海军实验室所发射的 P78-1 卫星 (Solwind) 上的白光日冕仪，它在 1979~1985 年间观测到 1200 多个 CME ；第三个是 SMM 日冕仪，它在 1980 年及 1984~1989 年期间共观测了 1300 多个 CME 。这些卫星日冕仪从最低的 1.6 $R_\odot$ (SMM) 到最高的 10 $R_\odot$ (Solwind) ，分别观测到距日冕不同高度的 CME [9] ；第四个是运载在 1995 年 12 月 2 日发射的 SOHO 上的 LASCO ，它把对 CME 的观测扩展到 30 $R_\odot$ [15] ，并可以对大、小尺度和开、闭场位形进行观测 [16] 。 SOHO 的远紫外成像望远镜 (EIT) 提供了与 CME 相关的过渡区和低日冕区的动力学过程的图像。与此同时， Michelson Doppler 成像仪 (MDI) 也提供了全日面磁场的系统观测图像，磁图的分辨率和灵敏度都是前所未有的。另外，阳光卫星 (Yohkoh) 的软X射线观测，提供了在更高温度域内 ($\geq$ 3.0 MK) 的日冕动力学图像 [1] 。这些日冕仪与 SOHO 上其它仪器相配合，可以了解 CME 结构和过程的细节，从而获得 CME 内部的密度、温度和速度等信息，这对于从观测上研究 CME 的起源是极为重要的 [16,17] 。

日冕仪的观测缺陷还可以由另外一些近日冕和行星际 CME 观测来补充。例如高山天文台 (HAO) 的地基 K – 日冕计观测，其高度范围是 1.2~2.2 $R_\odot$ ；自 1975~1983 年， Helios 飞船上的黄光光度计在行星际介质中已获得了 1982 个 CME 的观测。为了在最大程度上了解 CME 的源区，通常把 CME 的空间、地面观测与其它太阳表面活动的观测联系起来。这些观测包括远紫外波段 (EUV) 观测、硬 X 射线和软 X 射线观测、具有空间分辨的微米波和米波的射电观测，以及世界范围的耀斑和暗条的光学巡视观测等。基于这些丰富的观测资料，太阳物理学家也提出了多种阐明 CME 初发机制的理论模型 [9] 。正是这些众多的观测与研究，使人们对 CME 的认识越来越清晰。

3　CME 与太阳表面磁活动的关系

3.1　相关性研究的物理思路

CME 是日冕瞬变现象中最重要、最引人注目的部分，是一种大尺度现象 [18] ，它必然有大尺度的磁场结构与之相联系，这种大尺度磁场结构至少覆盖几十日面度。为了更好地理解 CME ，需要知道是否存在一种内在的大尺度太阳磁场，以充当 CME 的载体。汪景琇等人 [1] 提出由一种小尺度磁活动影响大尺度磁场结构不稳定的思路，他们注意到至少其中有一种大磁场结构是连接两个相反半球活动带的巨磁环 (Giant magnetic loop , GMLs) 或跨赤道的巨磁环 [19] ，这些巨磁环的一个足点扎根在强活动区，表现出明显不平衡的磁通量。同时在光球磁场中存在典型的和小尺度的磁场演化，这种磁场演化会引起能量的积累和爆发式释放，并可能造成大尺度磁场结构的不稳定和爆发，具体体现为太阳表面磁活动 (如耀斑、暗条爆发等) 与 CME 的伴生关系。

研究 CME 和其它太阳表面活动的相关性非常重要。首先从观测的角度来看，白光日冕仪不能对 CME 源区进行直接观测，同时，白光的汤姆孙散射只反映被散射物质的密度变化，

而理解 CME 源区，至少应知道源区等离子体很宽的温度变化范围[9]。如果 CME 是和这些表面活动相关，那么对太阳表面活动进行多种非日冕仪观测包括源区物质的温度、密度和磁场的变化，将对理解 CME 产生的物理过程非常重要。其次，我们需要了解大尺度活动和相对小的尺度现象之间的物理衔接，寻找不同尺度的太阳活动现象之间共同的特征(包括从宁静太阳上的微暗条爆发到全球尺度的晕状 CME)，并掌握空间尺度的差异影响它们物理性质的过程。最重要的是，如果能了解 CME 和其它可观测的太阳表面磁活动之间的联系，就能通过其它太阳表面磁活动来认识 CME 的起源和发展过程，并由此预报 CME 。

3.2 CME 与耀斑

太阳耀斑是发生在太阳表面局部区域中大规模的能量突然释放过程，其中涉及到许多复杂的物理过程，包括 10^{25} J 量级的磁积累，等离子体微观不稳定性的发生，高能粒子的加速和传播方式，与背景等离子体相互作用产生的从 γ 射线、 X 射线、紫外和可见光直至射电波段辐射增强的机制，与之同时发生的耀斑区大气动力学过程和物质抛射现象等[20]。太阳耀斑与磁能的快速释放有关。大耀斑发生在磁场高度剪切的磁复杂区，在 10^{18} cm^2 的面积内，几分钟就能够释放 10^{25} J 的能量。这种能量的释放有时(并非因果关系)伴随着物质抛射，总质量可达到 10^{15} g，速度超过 100 km/s。这些被释放的能量存储在活动区强磁场结构中，持续时间可达几小时至几天[21]。 1993 年 Gosling[22] 在著名的“耀斑神话”中指出，形成空间灾害天气的主要原因是 CME 而不是耀斑，这使人们开始重视 CME 的研究，同时也开始注意到耀斑和 CME 间的不可分割性。

Pallavicini 等人[23] 研究了 Skylab X 射线耀斑事件，他们将耀斑分为两类：小体积、低高度和短寿命(几十分钟)；大体积、较高高度和长寿命(几小时)。前者被称为致密耀斑，与 CME 无关；后者被称为爆发式耀斑，多与 CME 相关。研究结果表明，大部分与 CME 相关的耀斑是长寿命的。上述研究和耀斑的重联模型形成了最早的两类耀斑的概念，并一直延用至今。 Sheeley 等人[24] 利用 P78-1 卫星和 GOES X-ray Monitor 数据进一步研究了 X 射线耀斑与 CME 之间的关系。他们发现 CME 与 X 射线耀斑相关的可能性随 X 射线耀斑寿命的增加而增加。持续时间大于 6 h 的 X 射线耀斑都和 CME 相关。随后， Webb 等人[25]、 Kahler 等人[26] 和 Harrison 等人[27] 的研究证实了上述结论。 X 射线耀斑持续时间越长，其相关的 CME 角宽度似乎也越大。短寿命的耀斑通常是致密的，它们和 CME 的相关非常有限。

Harrison[28] 利用 1986～1987 年由 SMM 记录的 151 个 CME，结合耀斑资料，对 CME 和耀斑的相关性作了一次具体的统计研究。结论是： (1) 耀斑和 CME 有很强的相关性，寿命较长、较亮的大耀斑更可能与 CME 相关； (2) 与 CME 伴生的耀斑可发生在 CME 前、 CME 期间和 CME 后的任何时间，但最有可能发生在 CME 开始的几十分钟之内，且没有证据表明两者必须同时发生； (3) 与 CME 相关的耀斑可在 CME 范围内的任何地方发生，相对于 CME 没有位置倾向； (4) CME 和耀斑之间是紧密联系的，但两者的特征没有表现出明显联系。耀斑和 CME 并非相互激发，它们可能是日冕中同一物理过程的两种不同表现形式。引起耀斑事件的一部分磁活动，可导致磁结构的更大尺度的爆发。因此，耀斑的寿命、强度、位置和发生时间与 CME 的位置、上升速度和发生时间仅有不紧密的联系[16]。 Harrison 的研究结果为随后多人的研究所支持。

Švestka[29] 从另一角度来理解耀斑和 CME 的联系，他指出大部分 CME 开始于日冕暴

(coronal storms) 。日冕暴是由闭合的场线沿着纵场中心线打开而引起的现象。这种场线的打开可以沿着日面上任何结构不稳定地方的中心线。如果沿着活动区内的中心线， CME 就会伴有色球耀斑的发生；反之，就没有耀斑伴生。但是不管有没有耀斑发生，这两个过程以及日冕的变化 (长寿命的 X 射线事件) 是相同的。有耀斑伴生和无耀斑伴生的 CME 之间的差别仅在于场线打开区域的磁场强度不同，从而引起两类 CME 在观测上的差异。这可能说明耀斑和 CME 是同一磁场结构变化引起的不同现象。

一般认为与耀斑相关的 CME 的速度要快于与暗条相关的 CME 。 Yashiro 等人 [30] 从 1996 年 1 月到 2001 年 12 月 SOHO 记录的 4000 多个 CME 中，寻找出 239 个与耀斑相关的 CME 。他们研究了 CME 动力学能量与相关 X 射线耀斑峰值强度的关系，结果发现 CME 的速度和耀斑峰值流量之间的相关系数只有 0.52 。若不考虑日面边缘事件 (源区有较大的不确定性) ，相关系数只有 0.44 。这似乎不支持耀斑和 CME 有物理联系。但张杰等人 [31] 研究了 CME 和耀斑之间的时间关系，得出的结论是 CME 的脉冲加速相和相伴生的 X 射线耀斑的上升相符合得很好。耀斑上升相的寿命可能是几到几十分钟，这时相应的 CME 随着软 X 射线流量的增加速度明显增加。这表明 CME 和耀斑在物理上是有联系的。另外， Green 等人 [32] 研究了耀斑与相关 CME 之间的关系，指出在 CME 发生前耀斑所释放的能量要大于在 CME 初发后耀斑所释放的能量。这也意味着耀斑和 CME 间有一种内在的联系，它更倾向于说明 CME 及其相关的耀斑是同一磁结构不稳定引起的不同活动现象，这在一定程度上否认了耀斑和 CME 间是因果关系的观点。

关于耀斑及其活动区与相关的 CME 之间的相对位置也有一些统计研究。结果表明，相关耀斑活动区的位置与 CME 张角的中心线呈系统的偏离关系。 Harrison 等人 [33] 发现 1985～1986 年期间与 SMM CME 相关的耀斑活动区的位置系统地偏向赤道方向，而不是趋向于 CME 张角的一边。但 Kahler [34] 比较了 1986～1987 年期间与 SMM CME 相关的高纬度、新太阳周活动区的位置后发现， CME 穿过赤道在新太阳活动周的活动区间延伸，这些活动区几乎一直位于高纬度处，或在 CME 侧面靠近极区的一边。上述两个研究的主要差别是 Harrison 等人的研究范围是旧太阳周太阳活动极小年、低纬度活动区，而 Kahler 的研究范围是新太阳周、高纬度活动区 [9] 。从这两个结果的比较中可以看出 CME 对太阳周的意义。

3.3　CME 与日珥爆发

日珥是高温日冕中相对温度较低、较致密的物质，是处于日面边缘的非常普遍的现象，可用 Hα 谱线来观测。日珥物质有相对稳定的结构 (寿命是几小时至几天) 和相对暂现的结构 (寿命是几小时或更少) 。当日珥投影到日面上时，表现出吸收特征，被称作暗条，实际上日珥和暗条指的是同一活动现象。

日珥爆发和 CME 相伴产生是一种较为普遍接受的观点，因为在早期的白光日冕仪观测中，日珥爆发就是最壮观的日冕活动现象之一，它被观测到与 CME 相关，并且多表现为其明亮的核。另一方面， CME 被发现在没有伴生耀斑和活动区的情况下，单独和暗条爆发相关。如 Kahler 等人 [35] 发现 4 个 Hα 暗条的爆发开始于相关耀斑脉冲相开始之前，并且没有对脉冲相产生加速。因而这些爆发日珥的加速是独立于耀斑和它的脉冲相的。 Webb [6,36] 研究了 CME 、耀斑和日珥随太阳活动周的纬度分布，他们发现 CME 的纬度分布更接近于日珥的纬度分布。例如 CME 和日珥的纬度分布都在太阳活动极大年较极小年要平缓且延伸。另外，在

SMM 观测期间, 所有 SMM CME 的纬度 – 时间分布图更接近于冕流或日珥的同类分布图, 而不同于黑子 (蝴蝶图) 或活动区的同类分布图. 这些似乎说明了和耀斑相比, 暗条爆发与 CME 的相关性更加密切。

与爆发暗条相关的 CME 还被认为是物理上的一个独立分类。在早期的研究中, Webb [9] 就提到日珥是三分量结构 (明亮的前沿、暗穴和致密的核) CME 的重要部分。图 1 是 CME 与各种相关日面活动特征之间关系的结构图。图中 “堆积的等离子体” 所示部分即为日冕仪观测

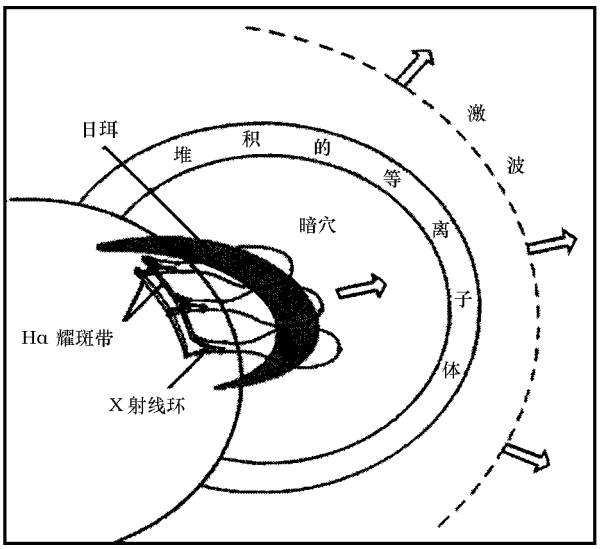

图 1 CME 和各种相关日面现象特征之间关系的结构图 [55]

到的 CME 的亮前沿, “日珥” 处为 CME 三分量中的致密亮核。这些亮物质结构和低日冕 Hα 暗条的物质相对应。所有暗条物质在向外传播的时候几乎全部离子化了, 但偶尔也能在 1 a.u. 下存在, 富含 He^+ [9] 。一些相关性研究还表明, 不仅爆发日珥经常伴生 CME , 而且如果仅有一种太阳表面活动与 CME 相关, 这种活动几乎只能是爆发日珥; 即使 CME 和耀斑相关时, 耀斑也常伴随着冷爆发物质。 Wilson 和 Hildner [37] 发现大约一半的磁云 (CME 在 1 a.u. 时的特征 [38]) 可能和太阳背面暗条的消失有关。一些行星际激波也被发现和 CME 相关, 而这种高能行星际现象单独来源于爆发日珥的高能粒子事件, 且没有耀斑伴随 [39,40] 。这类特殊的 CME 已引起了关注, 但有关它的研究还需要进一步开展。

SOHO 卫星的发射推动了 CME 相关性的研究, SOHO 不断发现 CME 和爆发日珥相伴生现象。 Gilbert 等人 [41] 分析了 1996 年 2 月到 1998 年 6 月期间的 54 个 Hα 事件, 研究暗条活动与 CME 之间的关系。他们把日珥分为两类: 爆发日珥和活动日珥。爆发日珥是指日珥的全部或部分物质抛离太阳的引力场, 一般都具有一个很强的远离日面的径向运动分量。一些爆发日珥几乎把它们全部或大部分物质都抛离日面, 而另外一些则将其中一小部分物质抛离日面, 随后, 这些被抛离的物质要么再回到日面方向, 要么悬挂在抛离时的高度上 (见图 2) 。活动日珥是指在 Hα 观测下没有明显的物质抛离太阳引力场的日珥活动, 其活动形式有多种,

比较显著的运动是日珥物质先是上升，然后又落向日面，或者上升后沿着日面作切向运动。Gilbert 等人发现爆发日珥与 CME 的相关性要比活动日珥强得多。其中 94% 的爆发日珥都伴生 CME，而只有 46% 的活动日珥和 CME 相关；同时，76% 的 CME 和爆发日珥有关，且 CME 中有可见的致密核 (来自于日珥)；而只有 17% 的 CME 和活动日珥相关，当然也有可见的核物质。Subramanian 和 Dere [42] 研究了 1996 年 1 月到 1998 年 5 月的 32 个 CME。他们把 CME 按相关的日面活动分为 3 类：(1) 和活动区相关，无暗条爆发；(2) 与活动区内暗条爆发相关；(3) 和活动区外暗条爆发相关。结果发现 41% 的 CME 和活动区相关，而未伴生爆发日珥；44% 的 CME 和活动区内的暗条爆发相关；15% 和活动区外的爆发暗条相关。

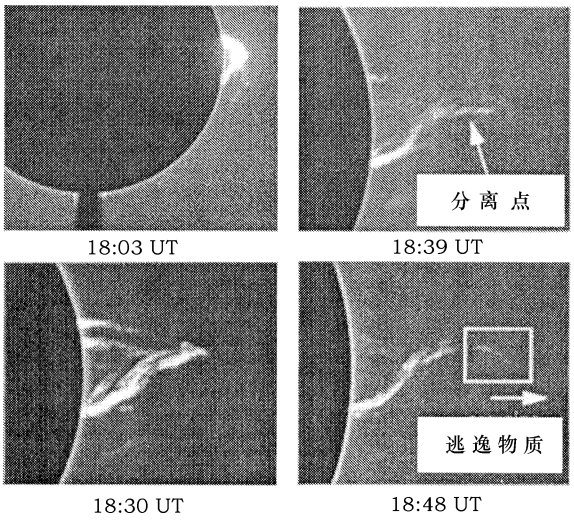

图 2　Hα 观测到的爆发日珥 [41]

1998 年 5 月 19 日发生的 CME 是一个和日珥爆发相关的典型事件，其中爆发日珥沿 CME 的抛射方向最终消失。图 3 是一张 LASCO C2 日冕仪拍摄的 CME 照片。所有 LASCO C2/C3 中都已减去了一个平均日冕背景，这样拍摄的 CME 结构和可能的日珥爆发物质的关系就比较清楚。图中的 CME 沿着太阳边缘的西北方向抛射出来。从图中可以看出爆发日珥物质沿着 CME 的前沿传播，离 CME 的前沿相差 1.5 $R_{\odot}$ 以上。通过高度－时间图将 CME 外推到 1 $R_{\odot}$ 处来看它的出发时间，就发现 CME 的初发早于日珥爆发 18 min。很明显，爆发日珥和 CME 的张角在图中是不一样的，说明它们来自于不同但很可能相联系的磁场结构。Simnett [43] 指出：(1) CME 的发生可以不伴生爆发日珥；(2) 当爆发日珥和 CME 相关时，爆发日珥会有一个较宽的张角，并约等于或稍窄于相关 CME 的张角；(3) 没有发现爆发日珥的速度超过相关 CME 速度的事件；(4) 在结构上大部分爆发日珥都位于 CME 的下面。

所有这些研究结果都充分表明爆发日珥和 CME 有着密切的联系，特别是极冠暗条的爆发必然会引起 CME，但是它们之间究竟是什么关系，即内在的物理机制仍很不清楚。随着对暗条通道和暗条磁场的更精确测量，暗条爆发机制的进一步理解，CME 的研究也将因此得到推动。继续从磁连接性上研究爆发日珥与 CME 的关系对理解 CME 是一项非常重要的工作。

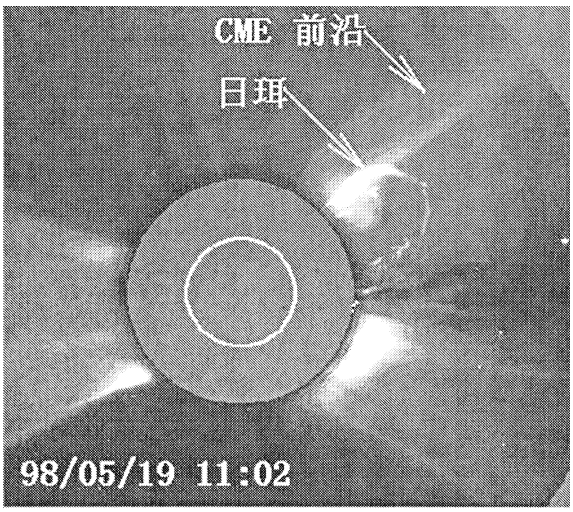

图 3 在 LASCO C2 白光日冕仪中观测到的边缘日珥爆发

3.4 CME 和冕流

冕流是日冕最突出的大尺度结构之一，在日食时用肉眼便可看到它们是从日冕底部向外延伸到很大距离的亮结构。冕流可分为两部分，即顶部和底部。顶部呈圆锥形，为流动所控制；而底部则为磁场所控制 [16] 。图 4 是 1980 年 2 月 16 日太阳日全食时比较典型的冕流示意图。

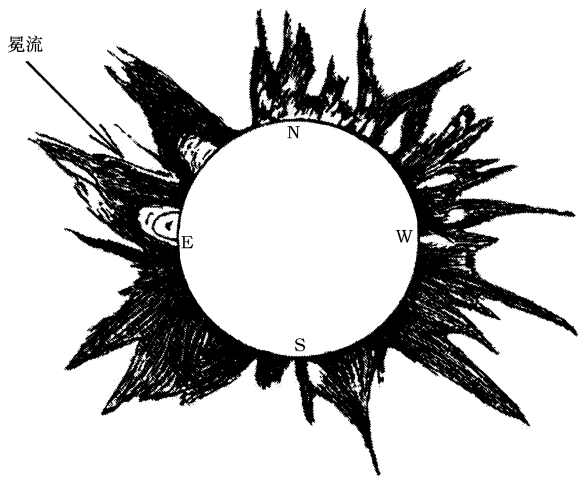

图 4 1980 年 2 月 16 日太阳日全食时冕流的图形 [56]

对于 CME 和冕流的关系，在前期研究中，它们被认为是密切相关的；而最近，人们又倾向于认为它们之间并没有很强的相关性。这个观点体现在多人的研究结果中。

Howard 等人 [44] 研究了由太阳风日冕仪记录的一类 CME 。他们发现相关冕流存在于 CME 膨胀和增亮之前，并随着日冕物质的抛射而消失。为此，他们创造了一个新词 “冕流爆裂 (streamer blowout) ” 来形容这类事件。另外他们还发现这类 CME 明显慢于其它类型的 CME 。随后， Illing 等人 [45] 研究了一个和暗条爆发相关的 CME ，也发现 CME 导致了冕流的消失。 Hundhausen [46] 研究 1984 年期间的 SMM CME 时发现，大约 50% 的日冕物质抛射与冕流结构的瓦解相关，冕流受 CME 影响在 “爆裂” 之前会变宽，在白光综合图中呈 “喇叭” 状，这导致相当一部分的 CME 在日冕白光综合图中看起来也像 “喇叭”。从以上研究可以看出 CME 和冕流是紧密相关的。这种观点持续了好多年，因为冕流和 CME 都是大尺度结构，

它们的相关在逻辑上是可能的，因此物理上的联系也较少被置疑。当然，这也可能是 CME 和冕流的相关性被研究得较少造成的。此后， McAllister 和 Hundhausen [47] 又进行了一个统计研究，他们发现 Yohkoh 软 X 射线观测的日冕拱事件 (coronal arcade events) 中有 73% 是和冕流带相关的，而目前较被接受的观点是此类 X 射线日冕拱是日冕物质抛射的表现，这进一步说明了大部分 CME 和冕流之间具有一定的相关性。

但最近， Subramanian 等人 [48] 利用 SOHO 上 LASCO 记录的 CME 作了一次统计研究，子样的选取时间是从 1996 年 1 月到 1998 年 6 月。他们的结论是 63% 的 CME 和冕流相关，这和 McAllister 等人的结果较符合；但他们发现仅有 16% 的 CME 导致冕流的瓦解，这与 Hundhausen 得出的 50% 的结论相差很大。另外，还有 8.5% 的日冕物质抛射后，产生类冕流状结构； 27% 的 CME 在纬度方向上偏离了冕流带，因此似乎和冕流没有关系； 46% 的 CME 叠在冕流上，但似乎对冕流也没有作用。他们对此的解释是 CME 可能从经度方向来自于太阳边缘，因而它们在“空间飞船”上的两维投影可能就非常弱，大约只有自身亮度的 20% ，而冕流不存在这种投影效应，所以较亮。在这种情况下，即使 CME 对冕流有作用，也找不到有力的证据。尽管有这种解释，但 Subramanian 等人的统计结果使 CME 与冕流的相关性受到了很大的置疑。

3.5　CME 和日冕暗化

日冕暗化 (coronal dimming) 首先是由 Thompson [49] 在 1998 年发现的。它是指日冕在一定区域随时间的推移而辐射下降的一种变化。当温度变化或物质耗尽时，一定波长的辐射就会减少。利用不同波长的观测很容易检测到温度的变化，因为物质耗损在每个波长上都能观测到。日冕暗化的特征首先是从 Skylab 卫星的 X 射线照片上得知的，由于它和冕洞在形状上相似，因此被称作瞬变冕洞 [50] 。研究日冕暗化特征的重要性在于日冕暗化是 CME 初发过程中物质抛射的标志 [49] 。 Harrison 等人 [18] 对和 CME 相关的日冕暗化区进行了分光研究。他们得出的结论是暗化区的形成主要是和物质损失相对应，这种物质损失至少占 CME 物质质量的 70% ，这表明日冕暗化区极有可能是大部分相关 CME 的源区。

CME 来源于闭合的磁场区域。于是人们猜想日冕暗化可能发生在磁场中心线的一边。Gopalswamy 和 Thompson [51] 研究的 1998 年 1 月 25 日的 CME 就是这样的例子。这是一个和耀斑、暗条爆发都相关的 CME 。它第一次出现在 LASCO C2 的白光视场中的时间是 15:26 UT 。为了更清楚地看到暗化区的散播，一般用 EIT 的后一幅图减去前一幅图就能得到一张新的较差图像。图 5(a) 就是这样一张 SOHO/EIT 滑动差图。在这幅图中，黑色的区域为环绕着爆发暗条的日冕暗化区域，它似乎在极性中心线的两边。暗化区域的中心条状结构是暗条的初始位置。暗条爆发开始于 14:01 UT ，并且有一小部分抛射后出现在太阳的边缘。这个条状结构最终被爆发后的耀斑后环所代替。图中“ CME ”处的前端为远紫外波段辐射增强的前沿。可以看出这些远紫外波段辐射增强部分环绕着暗化区域并非常显著地位于中心线靠近赤道的一边。暗化区沿着远离爆发区域的方向传播。暗条抛射物质前方较窄的暗前沿很像 CME 的暗穴。图 5(b) 中被抛射的明亮暗条可能就是 CME 白光照片中的中心核，其跟随 CME 的前沿传播。另外， dimming 从活动区沿着相关 CME 方向迅速扩展， Plunkett [52] 研究指出扩展的 dimming 总与 CME 相关。这说明了 CME 、 CME 源区和 dimming 的传播之间有着内在的联系，而且日冕暗化似乎是低日冕物质抛射的软 X 射线和远紫外波段观测最早和最明显的

特征，它已成为预报 CME 的一个极好的非日冕仪观测的现象。

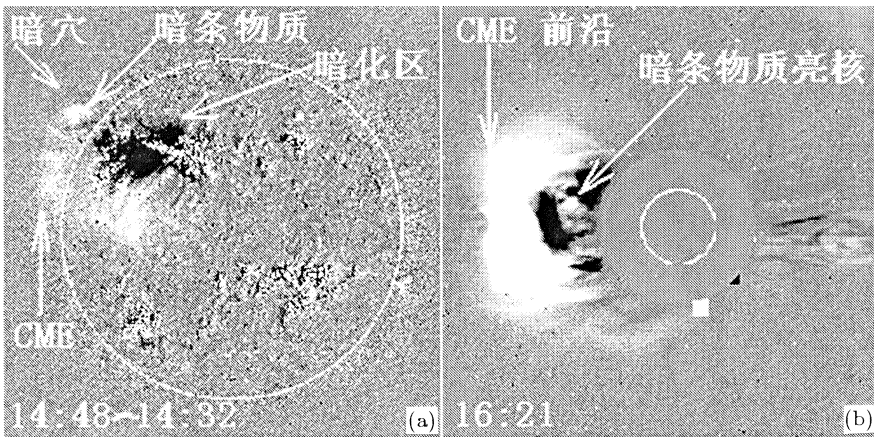

图 5 (a) 1998 年 1 月 25 日 14:48~14:32 UT 的 EIT 较差图像
(b) 亮的暗条物质在 LASCO C2 CME 结构中的位置和传播特征

4 讨 论

CME 的观测和研究已进行了 30 多年，虽然它的物理机制和源区情况仍不很清楚，但有关 CME 和太阳表面磁活动的相关关系的研究，包括统计研究、单个事例的研究以及一些综合和理论研究，在很大程度上推动了 CME 研究的进展。

随着新的空间设备对可见日面活动的观测，需要人们在以往研究结果的基础上，进一步

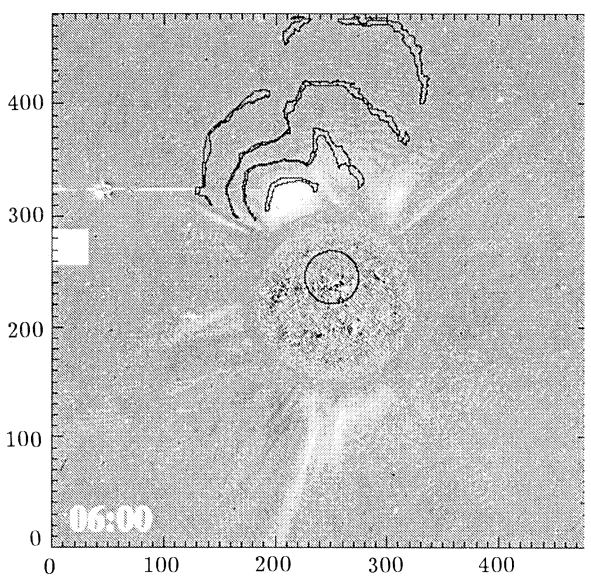

图 6 LASCO C2 和 EIT 较差图像的综合图 [54]

对 CME 和相关表面磁活动进行研究，证认 CME 的发生和发展过程。在 SOHO 发射前，晕状 CME (halo CME) 很少被日冕仪观测到 [53]，而对地 halo CME 非常适合于研究 CME 的源区，因为它们的大部分源区靠近可见日面的中心 [10]，其相关的太阳表面磁活动能够很好地被观测到。如图 6，其中轮廓线表示 halo CME 的传播方向，圆圈内表示 CME 的初发区域。为此，我们研究了 1997 年 3 月 ~ 2001 年 12 月期间在可见日面初发的 halo CME 与相关太阳表面磁活动的关系，并选择张角大于 130° 的 200 多个对地的 halo CME 作为研究对象。结果表明 CME 和表面磁活动具有紧密的相关性，尤其与耀斑和爆发日珥。这些不同尺度的太阳表面活动现象之间的联系，必然蕴涵着它们在物理机制上的某种关联。

众所周知，磁场的变化驱动了各种太阳活动现象，如耀斑和暗条的爆发。磁场在太阳中的活动主要发生在较高的色球层和日冕层，而这都不能被有效地观测到 [54]。张军和汪景琇 [54] 研究了一个和暗条爆发有关的 halo CME。他们指出，尽管和耀斑、暗条、CME 相关的磁场结构并不很清楚，但可以肯定的是在耀斑、暗条爆发和 CME 发生后，日冕磁场结构发生了本质的变化。远紫外波段在较低温度 (≈1.5 MK) 观测到的日冕暗化，意味着和 CME 相关的磁场不稳定扩张到较低的日冕层。日冕暗化的原因更有可能是物质密度的变化 (包括带有体积的膨胀)，而不是日冕等离子体温度的变化。这样的密度变化是 CME 源区强烈剪切的内核磁场磁爆发 (magnetic breakout) 的主要特征，其模型如图 7 所示。这个模型包括复杂磁拓扑和零

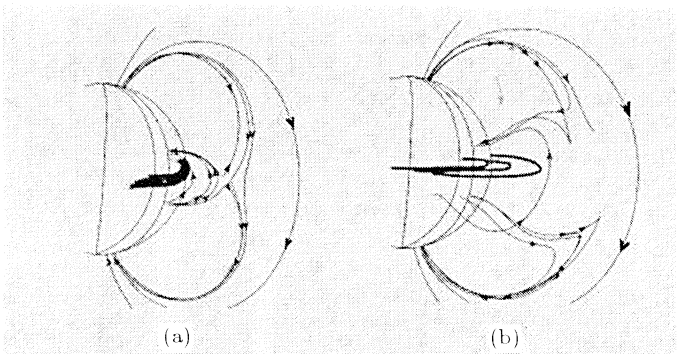

图 7　CME 磁爆裂模型 [57]

(null) 点的磁重联过程，最终低位剪切的磁环抛向行星际空间，日冕物质在膨胀和磁场线打开的过程中被疏散。另外，在耀斑、暗条爆发和 CME 过程中，视向磁场发生明显变化。极性相反的磁通量对消是磁场演化中最普遍的现象。磁对消的必然结果是磁场扰动和暗条爆发、耀斑的发生以及 CME 的出现，也就是说不同尺度的磁场的相互作用把 CME、耀斑和暗条爆发紧紧联系在一起。

所有这些研究结果均表明 CME 和太阳表面活动之间存在相关性。这意味着大尺度太阳活动 (表现为 CME) 和活动区尺度的活动 (表现为耀斑和暗条爆发) 之间有某种内在的联系。对这种内在联系的一种猜测是：引起 CME 的大尺度磁场结构，至少一部分是在磁复杂区，如活动区。源区的太阳活动代表了大尺度磁场结构整个不稳定过程的一部分，并导致了 CME 这类全球尺度的磁爆发。已被证实以磁对消形式出现的活动区尺度磁场与这些大尺度结构的相互作用，可能会向大尺度磁环转移磁能和磁螺度 [54]，这可能是导致这些大尺度不稳定、部

分打开并抛入行星际空间的原因[1]。因而，所有的 CME 都将伴随着源区的一些太阳表面活动，这些活动表现为耀斑、暗条爆发或两者都有的现象等。但是，并非所有活动区的小尺度活动都能导致大尺度磁场结构的不稳定性，这也是许多耀斑没有伴生 CME 的原因。至于其中的原因很值得进一步讨论。

尽管 CME 与表面磁活动相关关系的研究已取得了许多重要的结果，但仍有许多问题有待解决：

(1) CME 和大尺度磁场结构的关系；

(2) 哪些物理参数决定 CME 发生的时间、地点和速度？

(3) CME 和长期磁场演化的关系；

(4) 磁螺度在 CME 中的作用；

(5) 如果认为 CME 导致耀斑，作为一个大尺度过程怎样才能把能量聚集在小尺度的耀斑过程中？如果耀斑激波导致 CME 爆发，观测证据是什么？

(6) 小尺度过程无所不在，为什么不总与 CME 相关？

(7) 几乎所有 CME 都伴有软 X 射线增亮，那么什么是耀斑？是否需要重新定义？是否需要回到 Hale (1931) 的定义 —— 太阳爆发 (Solar Eruption)?

(8) 按照传统的 CME 和耀斑模型， CME 和耀斑、暗条爆发在位置上是对称的，然而为什么事实并非如此？

(9) 与耀斑相关的 CME 的触发机制是否不同于与耀斑无关的 CME 的触发机制？

(10) 太阳日冕现象、高能粒子事件和地磁爆发的联系是什么？

对 CME 研究的最终目的是了解它的触发机制，及时有效地进行预报。但不论是 CME，还是相关的耀斑和暗条爆发等日冕现象都是磁能的积累和释放过程。要进一步理解它们，必须从磁场结构演化中寻找这种相关性的物理根据。我们下一步的工作方向就是从此出发，了解与 CME 相关的大尺度磁场的位形以及源区的小尺度磁场的演化特征，从物理机制上进一步探讨 CME 。

参 考 文 献

1 汪景琇，张军，邓元勇等. 中国科学， 2001, 31(增刊) : 46

2 王水，李波，赵寄昆. 天文学进展， 2000, 18: 192

3 宋丽敏，张军，杨志良等. 天文学进展， 2002, 20(1): 33

4 Bond H E, Mullan D J, O'Brien M *et al*. ApJ, 2001, 560(2): 919

5 Munro R H, Gosling J T, Hildner E *et al*. Sol. Phys., 1979, 61: 201

6 Webb D F, Hundhausen A J. Sol. Phys., 1987, 108: 383

7 Harrison R A. Sol. Phys., 1990, 126: 185

8 St Cyr O C, Webb D F. Sol. Phys., 1991, 136: 379

9 Webb D F. In: Svestka Z, Jackson B V eds. Eruptive Solar Flares, Berlin: Springer, 1992: 234

10 Sterling A C, Hudson H S, Thompson B J *et al*. ApJ, 2000, 532: 628

11 Brueckner G E. In: Newkirk G Jr ed. IAU Symp. 57, 1974: 334

12 Kosugi T. Sol. Phys., 1976, 48: 339

13 Hudson H S. ApJ, 1978, 224: 235

14 Kahler S W. In: Paul S, Howard J S eds. Space Whether, Washington: AGU, 2001: 109

15 Domingo V, Fleck B, Poland A I. Sol. Phys., 1995, 162: 1

16 章振大．日冕物理，北京：科学出版社， 2000: 172
17 Howard R A, Brueckner G E, St Cyr O C *et al.* In: Crooken N, Joselyn J A, Feynman J eds. Coronal Mass Ejections, Washington: AGU, 1997: 17
18 Harrison R A, Lyons M. A&A, 2000, 358: 1097
19 Khan J I, Hudson H S. GRL, 2000, 27: 1083
20 林元章．太阳物理导论，北京：科学出版社， 2000: 460
21 Emslie A G. In: Schmelz J T, Brown J C ed. The Sun, A Laboratory for Astrophysics, Dordrecht: Kluwer Academic, 1992: 465
22 Gosling J T. JGR, 1993, 98: 18937
23 Pallavicini R, Serio S, Vaiana G S. ApJ, 1977, 216: 108
24 Sheeley N R Jr, Howard R A, Koomen M J *et al.* ApJ, 1983, 272: 349
25 Webb D F, Hundhausen A J. Sol. Phys., 1987, 108: 383
26 Kahler S W, Sheeley N R Jr, Liggett M. ApJ, 1989, 344: 1026
27 Harrison R A. Adv. Space Res., 1991, 11(1): 25
28 Harrison R A. Adv. Space Res., 1994, 14(4): 23
29 Svestka Z. Space Sci. Rev., 2001, 95: 135
30 Yashiro S, Gopalswamy N, Michalek G *et al.* Am. Astron. Society Meeting, 2002, 200: 3704
31 Zhang J, Dere K P, Howard R A *et al.* ApJ, 2001, 559: 452
32 Green L M, Harra L K, Matthews S A *et al.* Sol. Phys., 2001, 200: 189
33 Harrison R A, Hildner E, Hundhausen A J *et al.* JGR, 1990, 95: 917
34 Kahler S. ApJ, 1991, 378: 398
35 Kahler S W, Moore R L, Kane S R *et al.* ApJ, 1988, 328: 824
36 Webb D F. In: Kundu M R, Biswas S, Reddy B M *et al.* eds. Solar-Terrestrial Physics, New Delhi, India: Insdoc, 1986: 283
37 Wilson R M, Hildner E. JGR, 1986, 91: 5867
38 Klein L W, Brulaga L F. JGR, 1982, 87: 613
39 Cane H V, Kahler S W, Sheeley N R *et al.* JGR, 1986, 91: 13321
40 Heras A M, Sanahuja B, Domingo V *et al.* A&A, 1988, 197: 297
41 Gilbert H R, Holzer T E, Burkepile J T *et al.* JGR, 2000, 537: 503
42 Subramanian P, Dere K P. ApJ, 2001, 561: 372
43 Simnett G M. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2000, 62(16): 1479
44 Howard R A, Sheeley N R Jr, Michels D J *et al.* JGR, 1985, 90: 8173
45 Illing R M E, Hundhausen A J. JGR, 1986, 91: 10951
46 Hundhausen A J. JGR, 1993, 98: 13177
47 McAllister A H, Hundhausen A J. In: Balasubramaniam K S, Keil S L eds. Solar Driver of Interplanetary Disturbances, San Francisco, Calif: Astron. Soc. of the Pac., 1996: 171
48 Subramanian P, Dere K P, Rich N B *et al.* JGR, 1999, 104(A10): 22321
49 Thompson B J, Plunkett S P, Gurman J B *et al.* GRL, 1998, 25: 2465
50 Hudson H, Webb D F. In: Crooker N, Joselyn J A eds. Coronal Mass Ejections, Washington: AGU, 1997: 27
51 Gopalswamy N, Thompson B J. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2000, 62: 1457
52 Plunkett S P, Thompson B J, St Cyr O C *et al.* J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2001, 63(5): 389
53 Webb D F. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2000, 62: 1415
54 Zhang J, Wang J X. ApJ, 2001, 554: 474
55 Forbes T G. JGR, 2000, 105: 23153
56 Raju K A, Abhyankar K D. Bull. Astron. Soc. India, 1988, 16: 67
57 Antiochos S K, DeVore C R, Klimchuk J A. ApJ, 1998, 510: 485

Correlation Between Coronal Mass Ejections and Solar Surface Magnetic Activities

Zhou Guiping[1,2] Cao Zhuoliang[1] Wang Jingxiu[2]

(*1. Physics Department, AnHui University, Hefei 230039*)

(*2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

Abstract

This paper mainly overviews the recent progress on the relationship between Coronal mass ejections (CMEs) and flares, prominences, coronal streamers or coronal dimming. It points out some uncertain factors in such correlation studies. A part of the authors' work is introduced and some physical links among different scale magnetic activities are discussed. Finally, some important questions, which need to be resolved further, are presented.

Key words solar system—Coronal mass ejections (CMEs)—review—solar magnetic activity