

文章编号: 1000-8349(2008)02-0115-11



日冕物质抛射基本物理参数的统计特征

高朋鑫^{1,2}, 李可军¹

(1. 中国科学院 国家天文台 / 云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 日冕物质抛射 (CME), 是太阳大气中尺度最大, 最为壮观的太阳活动现象。自 1971 年 12 月 14 日, 人类第一次观测到 CME 以来, CME 受到了越来越多的关注, 许多空基日冕仪和地面设备对其观测得到了丰富的观测资料。但是, 直到现在, CME 的基本物理参数研究中还是存在一些不确定性, 当然其中也受观测设备局限性的制约。该文综述了近年来 CME 基本物理参数的统计特征——速度、加速度、角宽度及纬度等——研究的新进展, 指出了这些基本物理参数中存在的一些问题, 并提出了今后日冕物质抛射研究中要加强的一些重大问题。

关键词: 太阳物理学; 太阳活动; 日冕物质抛射 (CME)

中图分类号: P182.6 **文献标识码:** A

1 引 言

日冕物质抛射 (CME) 是尺度最大、最为壮观的太阳活动现象, 同时也是影响近地空间环境和驱动日地空间灾害性天气的最主要的太阳爆发事件^[1], 其携带的巨大能量和物质, 大量的高能射线和高能粒子被抛到行星际空间, 引起近地空间的地磁暴、电离层暴、极光等现象, 从而导致地球上的电网超负荷、通讯中断等后果, 影响人类的生活。因此对 CME 的研究与人类生活密切相关。

自从 1971 年 12 月 14 日, 人类第一次观测到 CME, 到 2006 年底, OSO-7 运行 19.5 个月观测到 27 个 CME, Skylab 在 227 天中观测到了 115 个 CME, Solwind 和 SMM 观测到的 CME 个数急剧增大, SOHO/LASCO 在 1996 年—2006 年观测到的 CME 事件个数超过了 10 000 个。表 1 对上述 CME 的空基观测做了一个小结。基于这些数据对 CME 统计特征研究的结果在下面作简要介绍。

收稿日期: 2007-06-09; **修回日期:** 2008-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10433030、10521001)

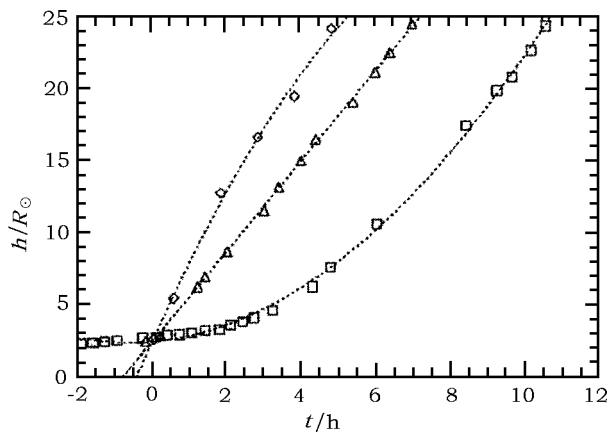
表 1 各种空基日冕仪对 CME 的观测小结^[3]

日冕仪	OSO-7	Skylab	Solwind	SMM	LASCO
观测时间	1971	1973-1974	1979-1985	1980, 1984-1989	1996-2006
视场范围 $/R_{\odot}$	2.5~10	1.5~6	3~10	1.6~6	1.2~32
观测到的 CME 个数	27	115	1 607	1 206	11 584
平均速度 $/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	—	470	460	350	458
平均角宽度 $/(^{\circ})$	—	42	43	47	44
平均质量 $/10^{15}\text{g}$	—	6.2	4.1	3.3	1.7

2 CME 的统计特征

2.1 CME 的速度

CME 作为一种运动的物质, 其速度是一个基本的特征量。由于目前观测的 CME 只是在天空平面的投影, 所以通常所说的速度, 是根据 CME 较快的前沿, 背离日心运动的“距离 - 时间”数据曲线拟合出来的。最常用的是线性拟合, 得到 CME 在日冕仪视场中的平均速度。有时为了研究的需要, 比如说想了解 CME 速度的变化, 会用到二次甚至更高次的拟合。图 1 给出了 3 个典型的“距离 - 时间”图像及其相应的最佳多项式拟合, 对 CME 到达 2.5 个太阳

图 1 SOHO/LASCO 观测到的三个典型的“距离 - 时间”图像^[3]

正方形为 1998 年 6 月 21 日的一个加速 CME 事件; 三角形为 2000 年 2 月 17 日的一个恒定速度的 CME 事件; 菱形为 1998 年 5 月 11 日的一个减速 CME 事件; 相应的点线是“距离 - 时间”的最佳多项式拟合 (恒定速度的事件是线性拟合, 另外两个是二次拟合)。

半径时的时间进行了归一化。当然 CME 前沿位置的测量存在误差, 在 CME 前沿位置的日心距比较小时, 误差迅速增大, 几乎和日心距的平方成正比; 5 个太阳半径以后变化变得平缓, 差不多和日心距的平方根成正比^[2]。但是在大量样本的统计研究中, 这个问题经常被忽略。

CME 的速度可以从几十 km/s 到达上千 km/s, 有的甚至可以达到 3 000 km/s。表 1 中的结果表明, 不同日冕仪观测到的 CME 平均速度在 400 km/s 左右。我们可以看到 SMM 观测到的 CME 的平均速度要低一些, 可能与其数据覆盖时间及它对一些快速 CME 的速度不能有效估计有关^[4]。可能也是因为这个原因, SMM 观测的数据并没有表现出在太阳活动周的极小年和极大年 CME 的平均速度有什么明显的不同^[5], 而其他的观测确实显示从极小年到极大年 CME 的平均速度有明显的增加趋势^[6]。SOHO/LASCO 日冕仪观测的 CME 数据更具统计意义, 其不仅覆盖时间长, 而且视场范围大, 观测到的 CME 速度从几十 km/s 到超过 3 000 km/s。Gopalswamy 等人^[4]对 1996—2002 年 SOHO/LASCO 观测到的 CME 进行了详尽的分析, 得到各年份 CME 速度分布直方图, 平均速度和中值速度的变化曲线, 如图 2 所示。可见 CME 的平均速度从太阳活动极小年到极大年变化达一倍, 且平均速度极大年发生在 2002 年, 即太阳活动极大年。Gopaswamy^[7]随后又分析了 1996 年 1 月—2005 年 6 月 SOHO/LASCO 观测到的 CME, 得到平均速度为 483 km/s。Yeh 等人对 1996—2003 年 SOHO/LASCO 观测到的与耀斑

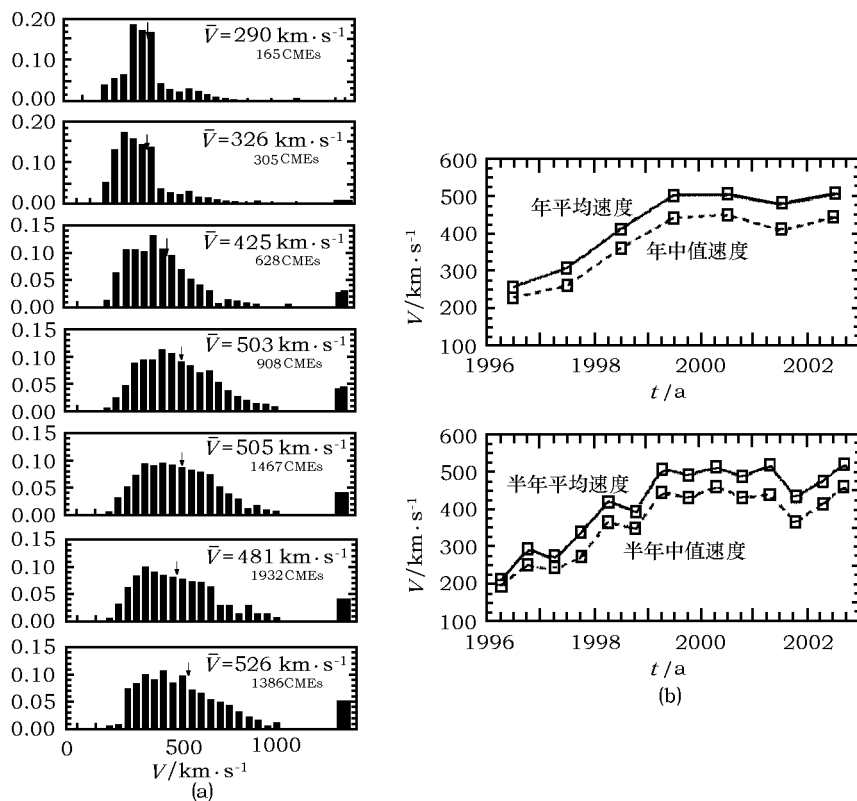


图 2 (a) 1996—2002 年 SOHO/LASCO 观测到的 CME 速度的逐年分布;

(b) CME 的年平均和半年平均速度以及年中值和半年中值速度分布^[4]

相关的 CME 进行了统计研究, 得到其平均速度为 549 km/s, 同时他们利用 Leblance 的方法进行了投影改正, 投影改正后 CME 的平均速度为 749 km/s, 可以看出投影效应对 CME 速度的影响很大, 也就是说 CME 的真实速度要比其视速度大很多^[8,9]。

根据 Gopalswamy 等人^[4]的统计结果, 超过 2 000 km/s 的 CME 比例很小 (25/8 008), 这个可能暗示着注入 CME 物质运动中的能量是存在上限的。他分析的 CME 事件中速度最大的是 2003 年 11 月 4 日观测到的 (2 675 km/s), 可能和 23 周中最大的耀斑相关^[4]。到 2006 年底, 观测到的速度最大的 CME 发生在 2004 年 11 月 10 日, 速度为 3 387 km/s。近年来的研究表明, 快速 CME 在运动至地球附近的过程中将减速, 慢速 CME 则有些加速, 这可能是受太阳风的影响^[10]。

Michanek 等人^[11]研究了 1996—2000 年的 72 个晕状 CME(日冕仪挡板一周亮度都增加的 CME), 得到其平均速度达 1 080 km/s, 比一般 CME 的平均速度高出一倍。Yashiro 等人^[12]也得到了类似的结果。最近, Cheng 等人^[13]对这种现象作了解释, 他们发现 CME 的速度与其亮度成正比。由于受 Thomson 散射效应的影响, 越明亮的 CME 越容易被观测到, 因而 CME 传播到天空平面附近时容易被观测到。故与发生在日面边缘的低速 CME 相比, 发生在日面中心的低速 CME 更容易被观测到。也就是说有相当一部分低速的晕状 CME 没有被发现, 而只有高速的晕状 CME 才容易被观测到。

长期以来 CME 被分为两类: 与暗条爆发相关的慢速 CME 和与耀斑相关的快速 CME^[14-17]。然而, Vrsnak 等人^[18]指出这两类 CME 的速度分布类似。两类 CME 都有相当比例的事件具有加速或减速现象, 两类 CME 都既有快速的 CME 也有慢速的 CME。他们认为两类 CME 是连续的事件, 没有必要将它们人为地分为两类^[18]。由于有相当一部分 CME 属于混和类型, Feynman 和 Ruzmaikin^[19]对传统的分类提出了质疑。为了使 CME 的分类在逻辑上比较完整, Chen 等人分析了 SOHO/LASCO 在 2001—2003 年内观测到的 CME, 并将其分为三类: 只与暗条相关的 CME(FE 型)、只与耀斑相关的 CME(FL 型)和既与暗条相关又与耀斑相关的 CME(混和类型)^[20]。他们的结果表明 FL 型 CME 的平均速度为 564 km/s, 只是比 FE 型 CME 的平均速度 (524 km/s) 略高一些, 而这两类 CME 的平均速度比混和类型的 CME 的平均速度 (738 km/s) 小得多。用 Kolmogorov-Smirnov 检验发现 FE 型 CME 与 FL 型 CME 的速度分布相似程度为 0.79。这说明这两类 CME 的差别没有达到需要将它们分为两类的程度^[20]。

通过分析 1996 年 10 月 19 日—2001 年 12 月 26 日间 SOHO/LASCO 观测的 CME 数据, Aoki 等人^[21]发现 CME 速度分布服从对数正态分布。基于 SOHO/LASCO 在 1998—2001 年观测的数据, Yurchyshyn 等人^[22]又一次证实 CME 的速度分布服从对数正态分布。前人的研究发现慢速 CME 一般是加速的, 快速 CME 一般是减速的^[10,16,23]。Yurchyshyn 等人^[22]对加速和减速 CME 速度的自然对数分布做了正态拟合, 发现两条拟和曲线几乎相同, 这意味着, 从统计上来说加速和减速 CME 没有物理上的区别, 有着相同的驱动机制, 但作为整体来说, 加速 CME 事件确实比减速 CME 事件要慢。

Qiu 和 Yurchyshyn 等人^[24]研究了与耀斑相关的 CME, 他们发现 CME 的速度与耀斑带扫过的总的磁通量具有很好的正相关。Chen 等人^[20]发现只与暗条相关的 CME 的速度与暗条通道处的总的磁通量具有很好的正相关。但是, 他们同时发现只与暗条相关的 CME 的速度与暗条通道处的平均磁场强度具有更好的正相关。这个结果与 Lindsay 等人的结果

一致, 他们发现高速的 CME 对应的星际磁场更强^[25]。CSHKP 模型认为磁重联发生在暗条或者磁绳下方, 磁重联的出流以入流区的阿尔芬速度抛射并推动上方的暗条或者磁绳爆发, 既然阿尔芬速度正比于磁场强度, 因此 CME 的速度与平均磁场强度 B 成正比也就不奇怪了^[20]。

2.2 CME 的加速度

我们知道上面提到的速度都是“距离 - 时间”的线性拟合得到的, 而有时为了研究的需要, 会用到二次甚至更高次的拟合, 而且从实际角度来看它的运动过程中肯定有加速度。毫无疑问, CME 代表一团物质抛离日面, 那么它的运动应该是多种力综合作用的结果。最简单的, CME 至少应受推力 F_p , 重力 F_g 和其他的阻力共同作用。根据 Chen 以及 Cargill 等人的理论描述, CME 刚从日面出发时, 需要有推动力对其加速, 此时推动力要克服 CME 本身的重力和其他的阻力; 而当 CME 传到远离日面一定距离时, 其所受的合力很可能指向日面, CME 运动的加速或减速过程就是这些力综合作用的结果^[26,27]。图 1 中的三种典型“距离 - 时间”轮廓反映了推力和阻力综合作用的结果: 加速轮廓表明推力在推动 CME 时起主要作用; 恒定速度和减速轮廓分别说明阻力平衡推力和阻力超过推力的情况。

由 HAO 的 K 冕观测仪 (视场 $1.2 \sim 2.7R_{\odot}$) 观测的数据得到 CME 的平均加速度一般都是正的, 而且比 SMM (视场 $1.8 \sim 5R_{\odot}$) 和 LASCO (视场 $2.1 \sim 32R_{\odot}$, C2 和 C3 的视场, C1 在 1998 年 6 月就不能正常工作了) 获得的平均加速度大^[28]。进一步联合挡板下的数据可以清楚地看到加速度是变化的^[15]。最近一些研究结果表明, CME 所受的推力一般在 $4R_{\odot}$ 内会消退, 此后 CME 所受的往回拉的力就起主要作用^[29]。那么在 LASCO 的视野内应该能看到 CME 的减速过程, 这一点也被 Yashiro 等人^[12] 的统计结果所证实。图 3 展现了不同速度范围内 CME 的加速度分布: (1) 慢速 CME ($V_{\text{CME}} \leq 250 \text{ km/s}$) 是加速的 (中值加速度, $a = 6 \text{ m/s}^2$); (2) 接近太阳风速度的 CME ($250 < V_{\text{CME}} \leq 450 \text{ km/s}$) 表现出极小的加速度 (中值加速度, $a = 1.6 \text{ m/s}^2$); (3) 比太阳风速度高的 CME ($450 < V_{\text{CME}} \leq 900 \text{ km/s}$) 表现为减速占优势 (中值加速度, $a = -4 \text{ m/s}^2$), 快速 CME ($V_{\text{CME}} > 900 \text{ km/s}$) 表现为明显的减速 (中值加速度, $a = -16 \text{ m/s}^2$)^[3]。

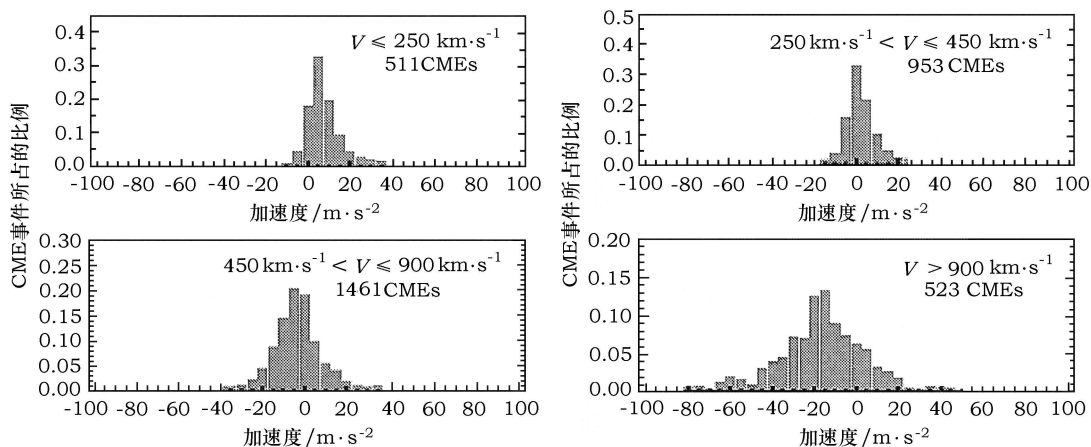


图 3 LASCO 在 1996—2003 年观测到不同速度范围 CME 的平均加速度^[3]

2.3 CME 的张角

CME 的张角 (视角宽度) 一般用日冕仪视场中 CME 两边缘之间的角度来表示, 其数值等于两边缘的位置角 φ_1 和 φ_2 之差, 即张角等于 $\Delta\phi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。对于起源于太阳边缘的 CME, 测量得到的张角接近它的真实宽度; 但是对那些远离太阳边缘的 CME, 测量得到的张角可能高于其真实宽度。许多 CME 在向外传播时视角宽度会增大, 所以要在视角宽度接近常数时进行测量。

St.Cyr 等人^[30] 测量了 1996—1998 年 SOHO/LASCO 得观测的 CME, 结果得到平均角宽度为 72° , 比利用其他日冕仪观测数据得到的平均角宽度大得多。Yeh 等人^[8] 统计了 1996—2003 年 SOHO/LASCO 观测的与耀斑相关的 CME, 得到平均角宽度为 77° , 与 St.Cyr 的结果类似。他们同时对 CME 的角宽度进行了投影改正, 投影改正后 CME 的平均角宽度只有 59° , 可以看出投影效应对 SOHO/LASCO 的观测结果影响有多大^[8,9,30]。Yashiro 等人^[12] 统计了 1996—2002 年每一年中 SOHO/LASCO 观测到的角宽度范围为 $20^\circ < width \leq 120^\circ$ 的 CME, 发现平均角宽度在 $47^\circ \sim 61^\circ$ 之间。他们还发现 CME 的平均角宽度在太阳活动极小年 (1996 年) 时最小, 在太阳活动极大年的开始阶段 (1999 年) 达到最大, 随后又减小, 如表 2。Gopalswamy 分析 1996 年 1 月—2005 年 6 月 SOHO/LASCO 观测到的角宽度 $width \leq 120^\circ$ (大于 120° 的角宽度可能不是真实宽度, 而是抛射影响造成的) 的 CME, 得到平均角宽度为 46° ^[3,7]。我们可以看到当我们除去角宽度大于 120° 的 CME 时, SOHO/LASCO 观测到的 CME 的平均角宽度就接近与 Skylab(42°), SMM(47°) 和 Solwind(43°) 的结果 (见表 1)^[6,31,32]。

表 2 1996—2002 年每年的 CME 平均视角宽度^[12]

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
平均角宽度 (中值)/($^\circ$)	47(43)	58(55)	56(53)	61(58)	57(52)	56(52)	53(49)

2.4 CME 的纬度分布

CME 的纬度分布一般是指 CME 的投影纬度 (或叫视纬度) 在日面上的分布。假设 CME 从太阳源区沿径向传播, 把 CPA 转化为 CME 的投影纬度 (以下简称纬度): 比如 CPA 为 0° , 90° , 180° 和 270° 转换成相应的纬度分别为 90° , 0° , -90° 和 0° ^[12,33]。但是 CME 从太阳源区沿径向传播的假设并不是所有情况下都成立的, 尤其是在 CME 的轨迹可能受控于太阳全球性偶极场的太阳活动极小年^[34]。在大样本 CME 事件纬度统计研究中, 在一定程度上可以使用这种纬度替代我们现在还无法精确测量的 CME 的真实纬度。

Howard 等人^[6] 对 Solwind 观测数据研究的结果和 Hundhausen 等人^[32] 对 SMM 观测数据研究的结果都表示 CME 发生在所有的纬度范围内, 但是低纬发生的事件比较多。CME 的纬度分布由太阳表面闭合磁场的分布决定^[3]。日球层电流片的倾角 (最大偏移, maximum excursion) 的大小决定高纬出现闭合磁场的多少^[3]。图 4 给出了和日珥爆发有关的 CME 的纬度随时间的变化, 以及日球层电流片的倾角 (最大偏移, maximum excursion) 随时间的变化。从图中可以看到跟以前对 CME 的观测结果类似, 23 周的上升相位, CME 的纬度一般接近赤道, 随后蔓延到所有的纬度; 在极大相位有许多极区 CME, 而且南半球的极区 CME 比北

半球多, 且发生的时间比北半球长。Yashiro 等人对 SOHO/LASCO 观测的 1996—2002 年的 CME 纬度进行了逐年分析得到 CME 事件纬度分布存在南北不对称性^[12]。

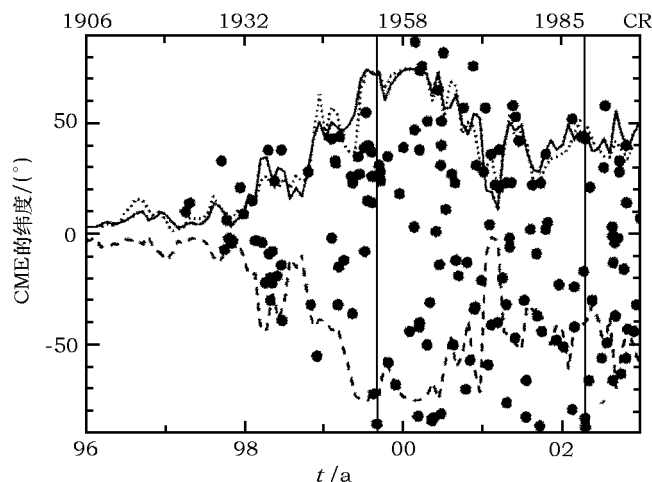


图 4 CME 纬度随时间的变化^[3]

上面的坐标是卡林顿自转周, 实心圆表示已知太阳源区 (由微波日珥爆发确定) 的 CME 纬度随时间的变化, 点线和虚线分别代表北半球和南半球的日球电流片的倾角; 实线是其平均值。两条竖直线表示高纬 CME 活动的开始和结束

2.5 CME 的发生频率

Webb 和 Howard 综合了 Skylab、SMM、Solwind 和 Helios 观测的 CME, 并作了可见度改正, 得到在极小年 CME 的发生率为 0.31~0.77 个/天, 极大年为 1.75~3.11 个/天^[35]。Cliver 等人^[36]也得到了类似的结果。St.Cyr 等人^[30]分析了 SOHO/LASCO 开始两年的 CME 观测资料, 发现 CME 的发生率随太阳活动周上升相稳定增加。Gopalswamy 等人^[4]分析了 SOHO/LASCO 在 1996 年—2002 年观测的 CME 事件, 得到从太阳活动极小年到太阳活动极大年, CME 的发生率从小于 1 个/天变化到大于 6 个/天, 在太阳活动极大年 CME 的发生率 (6.09 个/天) 比以前得到的 CME 的最大发生率 (3.11 个/天) 高很多。曾有一天 SOHO/LASCO 观测到了 13 个 CME。其中的原因一方面可能是 SOHO/LASCO 日冕仪的灵敏度和动力学范围优于以前的日冕仪^[3], 另一方面, SOHO 卫星的数据覆盖范围也比较宽。

Skylab 的数据表现出黑子数和 CME 发生率有一个比较好的相关系数^[37]。同时, SOHO 观测的 CME 数据表明 CME 发生的频率与太阳平均黑子数具有紧密的相关性, 相关系数可达到 0.86^[4], 但是 CME 发生频率的峰值 (2002 年 8 月 13 日—9 月 9 日) 与黑子平均数的峰值 (2000 年 7 月 10 日—8 月 6 日) 错开了一段时间, 这表明 CME 不全是来源于黑子区域, 还有一些是来源于非黑子区域, 如宁静暗条的位置等^[3]。

2.6 CME 的平均质量和能量

估计 CME 质量的方法首先要假设 CME 为完全电离化的氢等离子体, 其中含有 10% 的氦, 然后通过判断 CME 的体积和其中电子的数目来确定 CME 的质量。此外, 还可以根据 CME 中等离子体热辐射的性质, 通过射电、X 射线观测结果来估计 CME 的质量。与此对应, 在白光测量中基于汤姆逊散射, 所以常规的估计是运用白光观测的数据。从射电和 X 射线估

计出的 CME 的质量为 $10^{14} \sim 10^{15} \text{g}$ ，比从白光观测估计的质量小，但仍在从白光测得的质量值的范围之内。必须指出的是：从射电和 X 射线估计出的 CME 的质量对应区域离太阳很近，而从白光估计的质量对应比较高的区域（约几个太阳半径）。射电和 X 射线技术基于 CME 等离子体的热辐射性质，提供了一种交叉检验 CME 质量估计的方法。CME 的动能和势能则分别由 CME 的质量及速度和 CME 的质量及高度估算出来。

Hildner 等人最早研究了 OSO-7 和 SkyLab 日冕仪观测的 CME，得到 CME 的质量范围为 $1 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{16} \text{g}$ ，平均质量为 $6.2 \times 10^{15} \text{g}$ ，平均能量（动能 + 势能）为 $1.19 \times 10^{24} \text{J}$ ^[31]。Howard 等人^[6,38]研究了 Solwind 于 1979—1981 年观测的 CME，得到 CME 的质量范围为 $2 \times 10^{14} \sim 4 \times 10^{16} \text{g}$ ，平均质量为 $4.1 \times 10^{15} \text{g}$ ，动能范围为 $1 \times 10^{23} \sim 1 \times 10^{25} \text{J}$ ，动能平均值为 $3.5 \times 10^{23} \text{J}$ 。Gopalswamy 等人^[39]利用米波估计得到 1986 年 1 月 16 日 CME 的质量为 $4.2 \times 10^{15} \text{g}$ 。Jackson 等人^[40]由 Helios 光度计估测出 CME 的质量一般都大于 10^{16}g 。由于投影效应的影响，CME 质量和能量的测定存在一定的误差。光度计测量 CME 的平均质量和平均能量比日冕仪的测量结果高得多^[41]。

图 5 显示了 1996—2002 年 LASCO 观测到的 4 297 个 CME 的质量和能量特点的总结，给出了关于 CME 的平均质量、动能和势能的最近结果，分别是 $1.6 \times 10^{15} \text{g}$ 、 $2.4 \times 10^{23} \text{J}$ 和

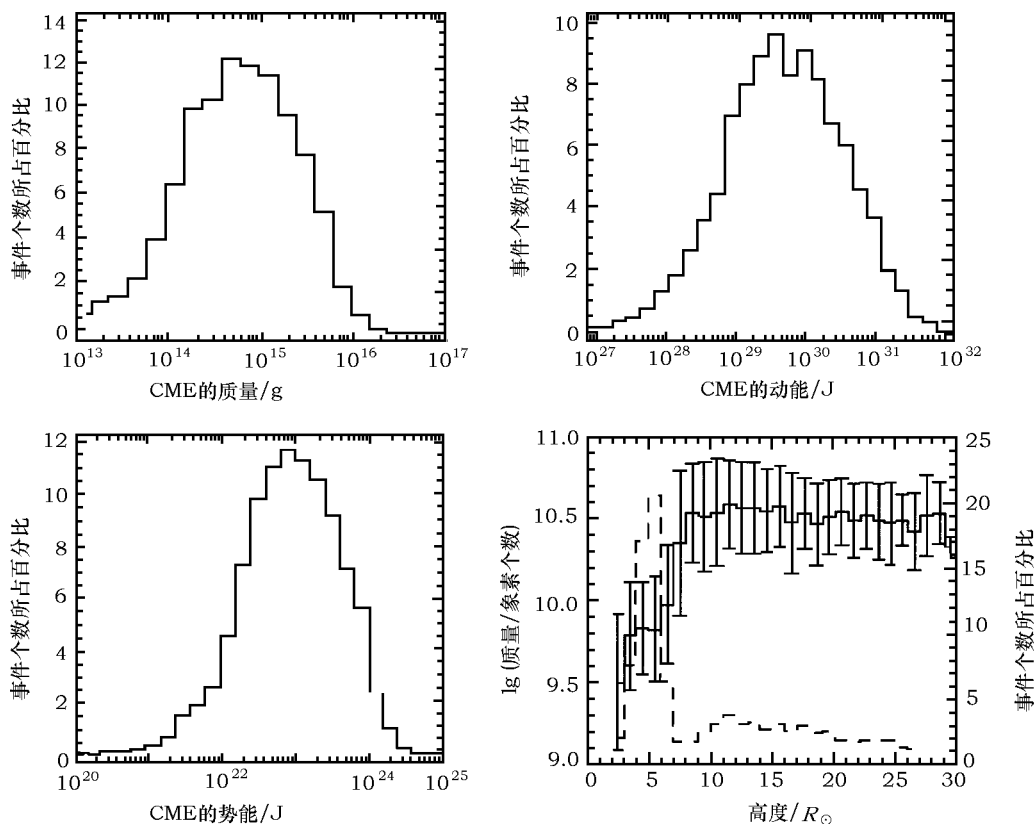


图 5 CME 质量、能量分布和质量密度随日心距的演化^[3]

在第 2 行右端的图中虚线的柱状图为 CME 被观测到的起始高度的分布

$2.5 \times 10^{23} \text{J}^{[3]}$ 。Gopalswamy^[7] 分析 1996 年 1 月—2005 年 6 月 SOHO/LASCO 的 CME 事件, 得到 CME 的质量范围为 $10^{13} \sim 10^{16} \text{g}$, 平均值为 $6.7 \times 10^{14} \text{g}$; 动能范围为 $10^{20} \sim 10^{25} \text{J}$, 平均值为 $5.4 \times 10^{22} \text{J}$ 。可以看出分析 LASCO 观测数据得到的 CME 平均质量低于根据以前日冕仪观测的估计结果, 这可能还是因为 LASCO 灵敏度和动力学范围都改善很多, 能观测到 10^{13}g 的 CME (15% 的 CME 质量低于 10^{14}g)^[3,42]。另外图 5 也显示了物质密度 (CME 在 LASCO 图像中对应于每个像素的质量) 随高度的变化, 我们发现 8 个太阳半径以内质量密度迅速增加, 8 个太阳半径以外质量密度保持稳定。在每一个高度范围内 CME 个数占总数的比例暗示达到比较大的高度的 CME 就拥有比较大的密度。在大视场的观测中, 如 SOHO/LASCO, 随着 CME 外环的移动, CME 的质量还会增加, 但是 20% 的 CME 在 5 个太阳半径内达到它们的最大质量, 几乎一半的 CME 在 LASCO/C2 的视场中达到其最大质量, 这说明 CME 的质量可能被低估。早期的研究中从日冕到行星际介质质量增长因子是 $3^{[43]}$ 。从 Yohkoh/SXT 和 SOHO/LASCO 观测的数据发现增长因子可以达到 $5 \sim 10^{[44-46]}$ 。需要指出的是 LASCO 观测的电影表现出在 CME 发生一天左右以后仍然有物质抛射。与从 CME 的图像中得到的 CME 质量相比较, 这种物质的强度和起源的系统研究是非常必要的。此外需要指出的是 CME 的平均质量会随太阳周有微小的变化^[47,48]。

2.7 CME 的温度和磁场

CME 的内核 (暗条) 中的等离子体的温度有 8 000 K 左右, 外部结构的温度可达几百万 K。有时候 CME 包括耀斑抛射, 它的温度可以超过几千万 K^[7]。太阳附近 CME 的磁场不能直接测量。暗条的磁场一般为 $3 \times 10^{-3} \text{T}$, 但是如果在活动区中心时磁场可以超过 0.1 T, 在外日冕磁场一般小于 10^{-4}T 。暗条上方的日冕暗穴的磁场因为压力平衡的原因应该比日冕要高。CME 在 1 AU 处磁场一般是 10^{-8}T 左右, 比平静太阳风中的磁场要高一个量级。如果我们简单地假定磁场与 $1/r^2$ 成正比, 那么 1 AU 处的 10^{-8}T 左右相应于太阳附近的 10^{-3}T , 和日珥的磁场及其推理得到上方暗穴磁场一致^[7]。

3 讨 论

以上简要地介绍了近年来 CME 基本物理参数统计特征研究的一些进展, 人们对 CME 基本物理参数逐渐有了更多的认识。这些参数的确定对理解 CME, 并建立 CME 物理模型是非常有用的。但是这些参数研究中存在一些不确定性, 主要有: (1) 对初发时期的观测很重要, 而目前这方面的观测数据很少, 上述 CME 基本物理参数不是在初发时期确定的; (2) 上述 CME 基本物理参数的确定, 都是基于目前我们在天空平面的观测而不是立体观测, 也就是说上述 CME 的基本物理参数是真实物理参数在天空平面的投影。

而且在 CME 的研究中仍有许多问题有待解决: (1) CME 的触发机制以及触发特征是什么? 哪些物理参数决定 CME 发生的时间、地点和速度? CME 怎样被加速? (2) CME 在行星际中是怎样传播的? 怎样与背景太阳风相互作用? 在这个过程中 CME 的加速度由什么决定? 在存在 CME 的情况下, 行星际空间的磁通量怎样保持平衡? (3) CME 的哪些参数会决定它的地磁效应? CME 速度是否是影响 CME 地磁效应的一个关键因素? 能引起大磁暴的 CME 与没有地磁效应的 CME 区别在哪里, 具体有那些观测特征? 如何利用现有的观测资料有效预报 CME 的地磁效应? 最有效的预报物理参数是什么? (4) 能否利用一些物理参数在

CME 发生前预报 CME 的发生, 以及 CME 发生后预报其对地有效性?

对 CME 的研究最终目的是了解它的触发机制, 及时有效的进行预报。但是要进一步理解不同特征 CME 的初发、行星际及地磁效应是否有明显的差别, 寻找这种相关性的物理根据, 并最终实现对 CME 的预报, 需要各国和各有关学科学者的共同努力。

致谢: 感谢审稿专家有益的建设性意见。

参考文献:

- [1] Gosling J T. JGR, 1993, 98: 18937
- [2] Wen Y Y, Maia D J F, Wang J X. ApJ, 2007, 657: 1117
- [3] Gopalswamy N. The Sun and the Heliosphere as an Integrated System. Poletto G, Suess S T, eds. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 201
- [4] Gopalswamy N, Lara A, Yashiro S, et al. Solar Variability as an Input to the Earth's Environment. Wilson A, ed. Noordwijk: ESA publications Division, 2003: 403
- [5] Hundhausen A. The Many Faces of the Sun: a Summary of the Results from NASA's Solar Maximum Mission. Strong K T, Saba J L R, Haisch B M, Schmelz J T, eds. New York: Springer, 1999: 143
- [6] Howard R A, Sheeley N R Jr, Michels D J, et al. JGR, 1985, 90: 8173
- [7] Gopalswamy N. JAA, 2006, 27: 243
- [8] Yeh C T, Ding M D, Chen P F. Sol. Phys., 2005, 229: 313
- [9] Lebane Y, Dulk G A, Vourlidas A, et al. JGR, 2001, 106: 25301
- [10] Gopalswamy N, Lara A, Lepping R P, et al. GRL, 2000, 27: 145
- [11] Michalek G, Gopalswamy N, Yashiro S. ApJ, 2003, 584: 472
- [12] Yashiro S, Gopalswamy N, Michalek G, et al. JGR, 2004, 109: 07105
- [13] Cheng J X, Yeh C T, Ding M D, et al. Coronal and Stellar Mass Ejections. Dere K, Wang J, Yan Y, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 112
- [14] Gosling J T, Hildner E, MacQueen R M, et al. Sol. Phys., 1976, 48: 389
- [15] St Cyr O C, Burkepile J T, Hundhausen A J, et al. JGR, 1999, 104: 12493
- [16] Andrews M D, Howard R A. Space Sci. Rev., 2001, 95: 147
- [17] Moon Y J, Choe G S, Wang H, et al. ApJ, 2002, 581: 694
- [18] Vrsnak B, Sudar D, Ruzdjak D. A&A, 2005, 435: 1149
- [19] Feynman J, Ruzmainkin A. Sol. Phys., 2004, 219: 301
- [20] Chen A Q, Chen P F, Fang C. A&A, 2006, 456: 1153
- [21] Aoki S I, Yashiro S, Shibata K. Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference. Kajita T, Asaoka Y, Kawachi A, Matsubara Y, Sasaki M, eds. Trukuba: Universal Academy Press, 2003: 2729
- [22] Yurchyshyn V, Yashiro S, Abramenko V, et al. ApJ, 2005, 619: 599
- [23] Sheeley N R Jr, Walters J.H, Wang Y M, et al. JGR, 1999, 104: 24739
- [24] Qiu J, Yurchyshyn V B. ApJ, 2005, 634: L121
- [25] Lindsay G M, Luhmann J G, Russell C T, et al. JGR, 1999, 104: 12515
- [26] Chen J. APJ, 1989, 338: 453
- [27] Cargill P J, Chen J, Spicer D S, et al. JGR, 1996, 101: 4855
- [28] Burkepile J T. American Geophysical Union, Spring Meeting 2002: SH22D-06
- [29] Chen J, Krall J. JGR, 2003, 108: 1410
- [30] St Cyr O C, Howard R A, Sheeley N R. JGR, 2000, 105: 18169
- [31] Hildner E. COSPAR, 1977: 19
- [32] Hundhausen A J. JGR, 1993, 98: 13177
- [33] Gopalswamy N, Lara A, Yashiro S, et al. ApJ, 2003, 598: L63
- [34] Gopalswamy N, Hanaoka Y, Hudson H S. Adv. Space Res., 2000, 25: 1851

- [35] Webb D F, Howard R A. JGR, 1994, 99: 4201
- [36] Cliver E W, St Cry O C, Howard R A, et al. Solar Coronal Structures. Rusin V, Heinzel P, Vial J C, eds. Tatranska Lomnica: VEDA Publishing House of the Slovak Academy of Sciences, 1994: 83
- [37] Hildner E, Gosling J T, MacQueen R M, et al. Sol. Phys., 1976, 48: 127
- [38] Howard R A, Sheeley N R Jr, Michels D J, et al. Adv. Space Res., 1984, 4: 307
- [39] Gopalwamy N, Kundu M R. ApJ, 1992, 390: L37
- [40] Jackson B V. Sol. Phys., 1985, 100: 563
- [41] Webb D F, Howard R A, Jackson B V. AIP, 1996, 382: 540
- [42] Vourlidas A, Buzasi D, Howard R A, et al. Solar Variability: from Core to Outer Frontiers. Wilson A, ed. Noordwijk: ESA Publications Division, 2002: 91
- [43] Jackson B, Howard R A. Sol. Phys., 1993, 148: 359
- [44] Gopalwamy N, Kundu M R, Hanaoka Y, et al. New Astronomy, 1996, 1: 207
- [45] Gopalwamy N, Hanaoka Y, Kundu M R, et al. ApJ, 1997, 475: 348
- [46] Howard R A. Coronal Mass Ejections. Crooker N, Joselyn J, Feynman J, eds. Washington D C: Amer. Geophys. Union, 1997: 17
- [47] Howard R A, Sheeley N R, Michels D J, et al. ASSL, 1986, 123: 107
- [48] MacQueen R M, Burkepille J T, Holzer T E, et al. ApJ, 2001, 549: 1175

Statistical Properties of Coronal Mass Ejections

GAO Peng-xin^{1,2}, LI Ke-jun¹

(1. National Astronomical Observatories/Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011 ; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Coronal Mass Ejections(CMEs), known as the most energetic form of solar magnetic activity, are now believed to be the main sources of the strong interplanetary disturbances that cause moderate to intense geomagnetic storms. Since CMEs were first discovered on Dec 14 1971 using the seventh Orbiting Solar Observatory (OSO-7) coronagraph, they have drawn more and more attentions. Several spaceborne coronagraphs and ground-based instruments have found a number of CMEs, which give a good chance to study them in details. Although CMEs are analysed for decades, there are still some uncertainties for a accurate measure of physical parameters of CMEs, for example, the CME latitude is still obtained just from the central position angle (CPA) of the CME, assuming that CMEs propagate radially away from the solar source region.

In this paper, we show the recent main progress on the statistical properties of fundamental physical parameters of CMEs, such as their speed, acceleration, width, latitude distribution and so on, in section 2. And some uncertainties in the determination of these fundamental physical parameters are presented in section 3. These uncertainties due to that (1) these parameters are not observed from a start phase of CMEs; (2) we measure these parameters with them projected just in the sky plane. Finally, we propose some important problems, which should be paid much more attentions for understanding CMEs well.

Key words: solar physics; solar activity; coronal mass ejections (CMEs)