

文章编号: 1000-8349(2012)02-159-13

STEREO 卫星的 CME 观测研究进展

张雪飞¹, 刘煜¹, 申远灯^{1,2}, 田占军^{1,2}

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

摘要: 简要回顾利用“日地关系天文台”(Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO)卫星的立体观测资料在日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)研究方面已取得的一些重要进展, 主要包括: (1) 通过极紫外成像仪观测到的日冕极紫外暗化来更准确地估计 CME 质量, 研究 CME 演化的结构特征; (2) 利用 STEREO 卫星日冕仪的双角度观测, 在 CME 立体传播特征方面取得的新进展; (3) STEREO 卫星日球成像仪具有广阔的视场范围, 可以跟踪研究 CME 从太阳表面爆发到形成行星际日冕物质抛射(Interplanetary CME, ICME), 及其在内日球层和近地空间的演化特征以及运动特征等。同时, 也介绍了利用三角测量技术测定 CME 特征物理量的新方法。

关键词: 太阳物理学; STEREO; CME; 三角测量

中图分类号: P182 **文献标识码:** A

1 前言

日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)是太阳表面最剧烈的大尺度爆发过程之一, 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, 2]。CME 以约 100 ~ 2 000 km/s 的速度抛向行星际空间, 在白光日冕仪中能够观测到明显亮于背景的瞬变现象。特别是 CME 朝向地球传播时, 它将对地球附近空间环境状态产生扰动, 引起各种地球物理效应(如产生近地空间的地磁暴、电离层暴以及极光等现象)。在过去的几十年中, 对 CME 的研究虽然已经取得了很多重大成果, 但是人们对其产生原因和传播机制仍然处于探索阶段。从空间天气预报的角度来讲, 对 CME 发生和传播的预报机制也还未能建立起来。因此, 对 CME 的研究还需继续深入和加强。

使用经验和理论模型研究 CME 在日地之间的演化时, 得到的理论结果与 CME 真正抵达地球的确切时间总有偏差。可以说, 目前研究者们还不清楚 CME 准确的爆发时间以及有何后随地球物理响应。早期的空间卫星, 如“太阳和日球天文台”(Solar and

收稿日期: 2011-07-18; 修回日期: 2012-03-19

资助项目: 国家自然科学基金(10933003, 11078004, 11073050)

Heliospheric Observatory, SOHO, 1995) 和“太阳过渡区和日冕探索者”(Transitional And Coronal Explorer, TRACE, 1998) 等空间卫星都是在地球附近空间(最远在第一拉格朗日点) 执行观测, 所观测到的太阳爆发现象主要是在天空平面上的投影。因此, 通过像“日地关系天文台”(Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO) 卫星那样对太阳进行立体监测, 有望在 CME 爆发的实质性因素研究方面取得重要进展^[3]。利用 STEREO 卫星适合研究的主要问题有: CME 的三维几何形态和磁拓扑结构, 伴随 CME 产生的日冕波动现象, CME 是磁驱动还是非磁驱动, CME 相关的磁重联等问题。

2 STEREO 详细介绍

STEREO 卫星的科学目标是: 理解导致 CME 产生的机制, CME 在日球传播中的特征, 太阳高能粒子在低日冕和行星际介质中的加速机制, 研究太阳磁场的三维结构、时间演化模型以及太阳风周围的密度、温度和速度结构^[4]。2006 年 10 月 26 日, 美国国家航空航天局(NASA) 将 STEREO 卫星成功送入预定轨道, 其搭载的所有仪器正常工作至今。STEREO 的数据通过 NASA 深空网络系统传送到地面, 然后发送到各个仪器群组以及 STEREO 卫星的科学中心。STEREO 卫星可从空间两个不同的角度观测太阳, 并提供太阳高层色球和日冕结构的三维信息, 进一步帮助太阳物理学家了解等离子体与磁场之间的相互关系, 以及由此引起的太阳爆发现象。卫星经过绕月飞行后, 达到预期的飞行角度, 进入距太阳约 1 AU 的预定轨道。在进入预定轨道后, STEREO 两颗子卫星分别位于地球前后, 飞行在地球前面的, 称之为“STEREO_A”卫星, 后面的称之为“STEREO_B”卫星^[5]。两颗子卫星在飞行过程中, 每年偏离地球的距离约 8×10^5 km, 这就意味着地球-太阳-卫星之间的角度, 从太阳的位置看, 每年将会增加约 22.5° 。STEREO 卫星上的每颗子卫星都搭载了 7 台仪器, 而其中 4 台仪器属于日地关系日冕和日球探测器(Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation, SECCHI)^[6]。SECCHI 装有一台极紫外成像仪(Extreme Ultraviolet Imager, EUVI)、两台白光日冕仪(Coronagraphs)COR-1 和 COR-2 以及一台日球成像仪(Heliospheric Imager, HI)。

这些仪器将研究 CME 从太阳表面产生到通过日冕、星际介质传播到地球附近区域整个过程的三维结构演化。SECCHI 的观测对研究 CME 在低日冕和星际介质之间传播提供重要帮助, 特别是 SECCHI 上的极紫外成像仪 EUVI, 它实质是 SOHO 卫星的极紫外成像望远镜(Extreme Ultraviolet Imaging Telescope, EIT) 的改进版, 但具有比 EIT 更高的空间和时间分辨率。极紫外成像仪 EUVI 的探测器像素是 2048×2048 , 视场为 $1.7R_\odot$, 4 个观测波段覆盖温度范围是几万 K 到几百万 K。这 4 个观测波段分别为 17.1 nm、19.5 nm、28.4 nm、30.4 nm。它们不仅可以用于分析研究 CME 的触发、磁重联过程、日冕暗化现象(Coronal Dimming)、活动区三维结构重构等, 而且有助于同时监测色球上部和低冕部分的活动^[5, 7]。

SECCHI 的白光日冕仪 COR-1 是一台内掩日冕仪, 光学结构是传统的 Lyot(里奥) 折射系统, 观测范围 $1.4 \sim 4 R_\odot$ 。COR-2 是一台外掩日冕仪, 可以测量日冕偏振光。日

球成像仪 HI 包括两个宽角度折射式望远镜^[8, 9], 为 HI-1 和 HI-2, 其视场范围分别为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 、 $0^\circ \sim 70^\circ$ ^[10]。

SECCHI 的这 4 台不同仪器相互配合, 对研究 CME 相关的动力学理论有重要意义, 对人们分析光球磁场剪切演化、日冕中磁流管扭转不稳定性、暗条爆发、耀斑和磁重联提供重要信息^[11]。SECCHI 对行星际激波、行星际粒子流、太阳高能粒子以及相应的空间环境响应进行实时监测, 这为相关的理论预报工作提供了边界条件和观测检验。

对于 STEREO 卫星的运行轨道设计以及两子卫星之间夹角的安排, 科学家们也做过详细研究^[12]。当两子卫星之间的分离角度较小时, 是探测日冕结构的最佳时机: 其中当夹角小于 20° 时, 是极紫外成像仪 EUVI 探测冕环精细结构的最佳时机; 当夹角在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间时, 是探测朝向地球方向传播的射电辐射的最佳时机。伴随着两子卫星之间夹角的不断变化, 结合观测需求, STEREO 研究团给出了 STEREO 科学使命的四个阶段: 第一阶段是在发射后约 1 a 内, 两子卫星的夹角小于 50° 时, 适宜研究分析冕环结构的三维成像, 这个阶段也是仪器校正的重要阶段; 第二阶段是两子卫星之间的夹角在 $50^\circ \sim 100^\circ$ 之间时, 相当于发射后 400 ~ 800 d, 这是 CME 的三角测量最佳时机, 可详细研究它的许多特征 (CME 组成成分、在距太阳 1 AU 处的磁场、密度和速度) 及初始和传播过程中的参数 (大小、速度和发射源区的特征); 第三阶段是发射后的 800 ~ 1 100 d, 即在卫星进入日球轨道 2 a 后, 两子卫星之间的夹角处于 $110^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 这时它们几乎能够观测到完整的太阳表面全部区域; 第四阶段, 两子卫星的夹角大于 180° , 可以详细观测日面上背向地球方向爆发的事件, 此时结合地面和地球附近的空间设备, 太阳表面上任意活动区爆发的事件都能够被全面跟踪观测, 这对太阳物理研究和空间环境预报提供了重要的帮助^[5]。

SECCHI 不仅开创性地为 CME 提供了立体观测, 也对其他的一些日冕结构和活动包括冕环、极羽、暗条、耀斑等提供丰富的三维资料^[13]。限于篇幅和研究兴趣, 本文仅重点介绍利用 SECCHI 获得的关于 CME 产生、演化及其三维结构成分探测的最新成果。

3 CME

CME 是由大量等离子体物质从日冕层被快速抛射出去并传播到行星际空间的一种现象。通常, CME 携带的质量在 $10^{11} \sim 10^{13}$ kg 范围内, 速度量级可以从几十千米每秒到上千千米每秒, 有的速度甚至能够达到 $3\,500$ km/s^[14]。CME 携带的高速等离子体流抵达地球附近后, 与地磁场相互作用可引起强烈的地磁暴, 严重影响到地球上层大气环境, 所以对 CME 的研究相当重要^[15]。多年来, 虽然人们对 CME 进行了大量研究, 也取得了一些初步进展, 但是有关 CME 的起源以及触发阶段的运动特征等问题至今并未完全搞清楚。我们知道, 传统上对 CME 最有效的观测是利用日冕仪在可见光波段的连续成像^[16], 但是, 以前日冕仪资料提供的仅是 CME 在天空平面的二维投影。人们若要进行资料的三维扩展, 需要借助一定的假设和模型。例如以往在分析 SOHO 日冕仪的观测数据时, 人们假定 CME 传播到约 $2 R_\odot$ 处时的角宽度仍然保持恒定, 并通过一个理想的锥模型来间接确定 CME 的几何参数^[17-21]。

现在,人们根据 STEREO 卫星提供的三维观测数据,不仅可以直接测量得到一些 CME 的参数,而且可以为理论模型提供约束和改进,使其计算出的 CME 在三维空间的运动和结构特征更符合观测,为空间天气预报提供更可靠的参考^[22, 23]。

3.1 CME 质量的测定

日冕暗化是指在低日冕的一定区域内,极紫外、软 X 射线波段上的辐射光强在短时间内的突然下降现象,它们常伴随有 CME。暗化现象经常能在软 X 射线波段上被观测到,尤其在极紫外波段更加明显^[24, 25]。暗化很可能是由于内冕闭合磁场突然被往外拉伸,产生很强的物质外流损失而导致。日冕暗化既能发生在日面上,也能发生在日面边缘之上。大量的研究表明 CME 与暗化过程在时间和空间上均存在很强的相关性。

从理论上讲,由于物质守恒,在 CME 前沿部分积聚的物质需要通过暗化区域的物质损耗来达到平衡,因此通过研究日冕暗化可以间接推定 CME 所携带的质量、CME 源区特征等,为研究 CME 的触发机制提供帮助^[26-28]。在 STEREO 卫星之前,许多研究者利用 SOHO/CDS 或者 SOHO/EIT 的数据,通过研究特定极紫外暗化区域来估算暗区的物质损失量、暗化区域的时空演化,但这些研究中的一个明显缺陷就是这些观测数据要么仅是来自日面,要么仅是来自日面边缘以上,缺乏有效三维空间的信息^[26, 27, 29, 30]。利用 STEREO 卫星双角度的观测,不仅可以提高定量测量 CME 质量的精度,而且还可以限定模型参数,提高理论研究 CME 与极紫外暗化关系的能力。

Aschwanden 等人使用了一个具有球形泡状几何结构的 CME 模型,首次研究了 CME 触发阶段的运动特征以及由此导致的极紫外暗化^[31]。该模型使用了 14 个自由参量来拟合 STEREO EUVI 的观测,作者声称在四维空间中(包含三维几何和一维时间)他们的结果成功地再现了 2008 年 3 月 25 日 CME 的密度分布及其源区极紫外暗化的特征,获得了 CME 初始加速度及其源区的一些珍贵参数,包括在小于 $0.6 R_{\odot}$ 范围内 CME 的速度和加速度。该研究根据 STEREO 观测模拟出了按时间系列 CME 演化的结构特征,得到了极紫外暗化现象,计算出质量损失;反过来,STEREO 观测也进一步对模型中使用的物理和动力学初始参数进行了有效限定。这样的研究结果对于根据 STEREO 空间观测来实时预测相应的空间天气变化很有帮助。但作者同时也认识到了这种模型的局限性,它过于简单化和理想化,仅适用于球形泡状观测结果。并且即使是同一个 CME,从空间一个角度观察,它是球形泡状,但从另一个角度观测时,也许是另外一种形态。笔者在文中也指出,2008 年 3 月 25 日观测到的 CME 虽然在 EUVI/A 的视场中是泡状的,但在 EUVI/B 中却呈现出形态和密度均非对称的复杂结构。因此,构建三维 CME 结构是个复杂的工作,必须结合三维观测才能更加完善。

STEREO 双角度观测,还提供了紫外成像仪和日冕仪的同时观测比对,为进一步精确测定 CME 质量提供了可能^[32]。这里要提到的是 Aschwanden 等人利用 STEREO 卫星极紫外成像仪和日冕仪的观测,提出了一种测定 CME 质量的新方法^[33]。这种方法实质上是分别从 STEREO_A 和 STEREO_B 卫星观测中找出同一 CME 事件,通过测定日冕等离子体的形状和体积,可以计算在 CME 爆发后日冕等离子体损失的总质量,这也是首次利用 STEREO 卫星资料进行定量比较极紫外和可见光波段的观测数据来分析 CME。Aschwanden 等人也给出了 CME 和极紫外暗化之间的关系,并与 SOHO/CDS 和 SOHO/LASCO 的研究结果进行

了比较。从研究分析中还得到, 可见光波段的观测需要考虑汤姆孙散射的影响, 但极紫外辐射波段不用考虑。

3.2 CME 三维运动特征的研究

在 STEREO 发射之前, 人们往往会借助于模型或者日面附近的二次相关爆发来间接得到 CME 的三维结构特征。这主要是因为以往日冕仪得到的 CME 图像是在空间平面的投影, 致使 CME 的运动速度、形态等信息都会受到不同程度损失, 利用一台日冕仪的观测不可能克服投影效应的影响^[34-36]。现在我们可以利用 STEREO 卫星双角度的观测, 更准确地测量 CME 的三维结构特征, 甚至可以仅仅利用 SECCHI 日冕仪的数据就能分析研究 CME 的传播方向。当然, 我们也可以结合其它更多卫星的观测, 采用不同的新模型来研究 CME 的三维结构特征。这不仅可以验证模型的可靠性, 也将提高空间环境预报的准确性。

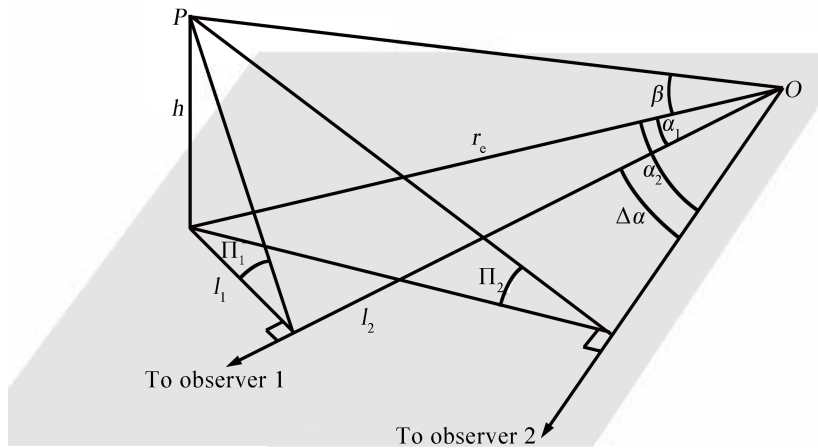


图 1 测定 CME 三维位置的几何关系, 点 O 表示太阳的位置, 点 P 是被观测点^[37]

Howard 等人利用 STEREO 和 SOHO 日冕仪数据, 采用普通的三角测量技术, 获得了在日面边缘上发生的两个 CME 事件的三维特征及速度^[37]。如图 1 所示, 通过假定这些卫星处在同一平面上, 并且 STEREO 双子卫星在太阳赤道面上的投影分别为位置 1 和位置 2, β 是被观测点 P 相对于太阳 (O 点) 的纬度, $\Delta\alpha$ 是 STEREO_A 和 STEREO_B 之间的夹角, Π_1 和 Π_2 是被观测点 P 分别相对于观测者 1 和观测者 2 的位置角 (Position Angle, PA), r_e 是被观测点在太阳赤道面上的投影到太阳 (O 点) 的距离, l_1 和 l_2 分别是被观测点 P 在太阳赤道面上的投影到两观测者的垂直距离。根据观测和精确的卫星参数, Π_1 和 Π_2 已知, 并且 STEREO_A 和 STEREO_B 之间的夹角 $\Delta\alpha$ 也已知, 通过三角几何关系^[37]:

$$\tan \beta = \tan \Pi_1 \sin \alpha_1 = \tan \Pi_2 \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \quad , \quad (1)$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{\sin \Delta\alpha}{\frac{\tan \Pi_1}{\tan \Pi_2} - \cos \Delta\alpha} \quad , \quad (2)$$

从式(1)、(2)中可以获得 β 和 α_1 的值。

Howard等人采用的这种三角几何方法能够计算出CME发生在日面上的经度和纬度,他们得到的结果也证实了,日冕需要连续几次爆发过程才能使日面上复杂的磁场结构完全演化掉,仅通过一次爆发往往是不够的。

日冕在可见光波段是光学薄的,在STEREO卫星之前的观测中,研究者们一般能够得到CME在视线方向上的投影积分。而Mierla等人利用STEREO卫星多波段的观测数据可以研究CME的三维拓扑和动力学特征^[38, 42]。Mierla等人根据局部相关跟踪技术(Local Correlation Tracking, LCT),在STEREO_A和STEREO_B日冕仪中分辨出具有相似结构的CME,并利用结合点(Tie-Point, TP)重构的方法(也称为LCT-TP技术)可以推断出CME的三维拓扑结构。他们也指出,如果能在STEREO日冕仪的观测图像上确定出CME质心(Center of Mass, CM),并结合TP技术(也称为CM-TP技术),可以获得CME质心的三维坐标^[42]。

Thernisien等人^[39]基于正向模拟技术,在几何结构上采用了柱形壳体模型,计算了CME在三维空间的传播方向、三维速度以及CME前导部分的加速度。

众所周知,单点观测的日冕仪的“高度-时间”测量法不能得到CME的真实速度^[40]。当“高度-时间”测量方法应用到STEREO卫星的两台不同空间位置的日冕仪上后,这一难题就迎刃而解。例如,Mierla等人利用STEREO资料使用“高度-时间”测量法快速测定了一次CME的真实传播方向和传播速度^[41]。它在CME方向的判断上比以往提高了精度,从而也提高了空间天气预报的精度;但它的缺点是采用了仿射几何,必须满足太阳到观测对象之间的距离与太阳到观测者之间的距离比值很小的条件,否则这种方法将失效。

另外值得一提的是,Mierla等人依据STEREO上日冕仪的观测数据,首次对偏振比技术(Polarization Ratio, PR)、正向模拟技术(Forward Modeling, FM),LCT-TP和CM-TP技术的模拟结果进行了详细比较,结果显示,除了PR技术之外,其余几种方法得到的CME的传播方向基本一致^[42-44]。同样,Liewer等人结合TP技术和三角测量技术模拟了5个CME事件的轨迹,他们的发现证实,CME在低日冕传播时,其方向可能在纬度上发生强烈偏转^[45]。

在STEREO卫星尚未升空之前,Pizzo和Biesecker曾于2004年专门针对STEREO数据设计了一种几何定位法(Geometric Localization Method)来模拟和计算CME的传播,研究表明该方法敏感于CME边缘的判断,尤其是远离天空投影平面(plane of the sky)的细微边缘的错误判断都将造成三维重构的较大误差^[22]。在STEREO卫星成功发射之后,Curt等人利用STEREO卫星日冕仪数据,首次验证了Pizzo-Biesecker几何定位方法的有效功能^[46]。而且他们指出,对于一个典型CME事件,使用这种方法往往不用超过5 min就能得到CME质心、前导部分位置以及向外的膨胀运动速度。虽然这种方法的计算过程存在一定局限,不适用于STEREO双子卫星夹角小于 30° 或大于 150° 的情况,但是可通过利用SOHO/LASCO在一定程度上来克服这种局限。如果通过计算马上得出CME的速度以及传播方向,则可根据这些初步结果来判断其是不是朝向地球,如果确定是的话就能计算出CME影响到地球环境的理论时间,从而及时对空间环境变化做出预报^[46]。

Boursier 等人提出了另外两种测定 CME 在三维空间传播方向的新方法^[47]。一种是在正向模型基础上, 采用半球壳结构模型 (Hemispherical Shell Model) 来确定 CME 表面结构的位置, 从而寻找和跟踪 CME 前导轨迹; 另一种是根据日冕强度图像, 寻找和跟踪 CME 的重心。针对 3 类不同 CME (半球壳型、磁流绳型、云状) 的结构, Boursier 等人用这两种方法分别计算了 2007—2008 年间 STEREO 日冕仪观测的 CME 事件。用这两种方法得出的 CME 的经度、纬度以及传播速度与使用 Pizzo-Biesecker 方法和 Thernisien 等人的方法 (Forward Modeling Approach by a Flux Rope) 得到的结果也基本一致^[22, 44]。同时 Boursier 等人进一步指出, 将来计划采用自动探测 CME 的方法来获取更多大样本的 CME 事件, 以便对他们的方法及其参数进行更严格的检验, 从而提高它们三维重构方法的可靠性, 并最终获得大样本 CME 的统计性特征。

值得一提的是, STEREO 日冕仪观测到部分 CME 事件中存在明显磁流绳结构。通过 STEREO 观测, 有望获得详细的磁流绳在三维空间的分布和演化规律。例如, Wood 和 Howard 研究了 2008 年 4 月 26 日的一次 CME, 发现其内部结构的形态可以用传统磁流绳模型来理解, 并且磁流绳外部还存在一个类似磁流绳驱动的激波造成的前导^[48]。他们根据 STEREO 观测定义了该磁流绳和 CME 前导的几何函数及其参量、初始方位参量和初始三维密度分布。通过时间序列的模拟, 他们证实了在大尺度空间传播过程中, 磁流绳的形态能够保持自相似, 磁流绳的方位也能够保持一定的稳定性。对于 2008 年 5 月 17 日的 CME 事件中的双前导结构, Wood 等人仍然根据观测定义了这两个 CME 前沿的几何函数及其参量、初始方位参量和初始三维密度分布^[49]。模拟结果证实了该 CME 具有两个质量不相等的前导结构, 并且它们包含了该 CME 的绝大多数质量。没有发现它内部存在明显的磁流绳特征, 其前导结构在传播中也保持着自相似规律^[49]。作者也指出, 由于它的主体不是磁流绳结构, 那么该 CME 的双前导结构和罕见的快速度 (最高 1 120 km/s) 让人很难理解其隐含的磁结构和驱动特征。因此 STEREO 提供的 CME 运动的新观测结果又为我们提出了一个有待解决的难题。

3.3 CME 在三维近地空间的传播

CME 是太阳大气中的一种剧烈爆发现象, 其中传播到地球附近空间的 CME 严重影响近地空间环境和驱动灾害性空间天气, 对它们的深入研究显得尤为重要。尽管过去已经积累了大量的观测和模型分析经验, 但还是不能完全理解 CME 的传播、运动特征。SOHO/LASCO 的视场范围约 8° , 而 STEREO 卫星日球成像仪可以拓宽到 90° , 当然 STEREO 卫星的观测方向也与 LASCO 不同, 它是从远离地球的空间以第三者的角度观测 CME 是如何传播和影响到地球附近空间的。简单地说, 它首次帮助人类直接研究行星际日冕物质抛射 (Interplanetary CME, ICME) 在内日球层与近地空间的发展、演化的整个过程。因为 STEREO 日球成像仪提供了前所未有的广阔视场范围, 它已经帮助人们在研究 CME 和近地空间环境方面取得了重要阶段性成果, 为 CME 在三维近地空间传播和空间灾害天气监测、预警提供了更加准确的数据, 有意义的研究成果不断涌现。

Harrison 等人展示了 STEREO 卫星日球成像仪的首批观测成果^[50]。从他们发表的观测图像中不仅可以清晰地分辨出水星和金星 (见图 2), 同时也能分辨出大量的恒星源, 显示了

宽视场监测的有利条件。Harrison 等人的这个工作报道了 STEREO 日球成像仪成功探测到的第一个 ICME 事件, 开拓了 CME 观测研究的又一新领域。



图 2 2007 年 1 月 25 日 STEREO_A 卫星上的 HI-1A 拍摄的图像, 横向伸长跨度为 20° ($80 R_\odot$), 可以看到图像中清晰的 CME(右), 金星和水星分别处在图像的左下方和右侧^[50]

Harrison 等人于 2009 年总结了日球成像仪在成功发射后 2 年左右的重要观测成果^[10]。他们首先指出这些成果是建立在结合多个成像仪共同配合的基础上取得的, 如此宽广的视场就是结合了 LASCO、HI-1A(B)、HI-2A(B) 等 5 套设备的视场。可以说, 在这些直接的新观测基础上, 人们现在对于 ICME 就是 CME 的行星际对应体已基本没有疑问了。在此文中, Harrison 等人甚至建议不再单独使用“ICME”, 而统一使用“CME”来表示离太阳任意远的物质抛射。虽然离太阳距离越大, CME 的亮度越低, 但通过改进图像处理技术, 人们在 STEREO 第一批资料中成功地发现了 1 个距离为 $171 R_\odot$ 的 CME 事件^[50], 这在 SOHO 时代是不可想象的。越来越多的工作发现在宽视场中汤姆孙散射效应与经典日冕仪观测存在不同之处, 一个所谓的汤姆孙球的概念引起人们的重视^[51]。Sheeley 等人还发现在所谓共转相互作用区域 (co-rotating interactive region, CIR) 中观测到的连续波动和近地卫星测量的高速太阳风中密度增强有着完美的相关性, 进而指出是来自冕洞的后随高速太阳风挤压前面的低速太阳风造成了观测中的高密度压缩区域^[52]。STEREO 日球成像仪除了观测到 CME 之外, 还发现了一些其他太阳系天体有关的有趣观测现象, 例如: 行星、彗星、小行星, 以及太

阳风和 CME 对它们的作用,但这不是 STEREO 的重点。需要指出的是,虽然单个日球成像仪能够跟踪 CME 传播到很远距离,但是很难直接从两个日球成像仪图像中构建出 ICME 传播的三维结构,包括真实方向。所以,日球成像仪的观测图像不能直接用来分析 ICME 的结构特征,期待借助诸多不同的模型来获得 ICME 的位置以及运动特征^[51, 53, 54]。

具体来讲,从日球成像仪数据中分析 CME 结构,会碰到很多实际问题,如往往只能在 STEREO 双子卫星的一台日球成像仪中发现 CME 的踪迹,另外一台未能或极难探测到,这就会影响推算 CME 的三维轨迹与速度的精度。因此,我们不能期待目前的观测能够完美发现 CME 所有的结构细节,能够探测到它们的某个特征体就已相当不错。例如, Maloney 等人利用 CME 轨道的三维空间重构技术,跟踪研究了 4 个 CME 事件的运动轨迹。这些轨迹其实也是基于 COR1/2 观测的外推拟合,抛射物质中的共同特征体也需通过人工识别,最后能够得到估算的 CME 速度^[55]。从这些结果中,他们发现比太阳风速度快的 CME 被减速,而比太阳风速度慢的 CME 被加速,最终趋势是 CME 的速度趋于太阳风的速度。

Davies 等人在处理 STEREO 卫星日球成像仪数据时,使用了一套基于“时间-角距”图 (time-elongation profile/plot) 的分析技术^[56]。“时间-角距”图是从较差图 (running difference image) 的时间切片合成而得的。这种方法类似地面常规日冕仪资料的处理手段,很简便,对跟踪和研究大尺度日球空间(可超出 1 AU)范围内的 CME 和其它瞬变现象提供了很好的工具。Liu 等人在前人的基础上提出了一种确定三维 CME 轨迹的三角几何测量法^[57]。如图 3 所示,假定 STEREO 卫星和地球都处在黄道面上, P 点是 CME 传播到的位置, r 是太阳到 P 点的距离, α_A 和 α_B 分别为 STEREO 卫星相对于太阳和 P 点之间的张角。给出简单的三角关系式^[57]:

$$\frac{r \sin(\alpha_A + \beta_A)}{\sin \alpha_A} = d_A \quad , \quad (3)$$

$$\frac{r \sin(\alpha_B + \beta_B)}{\sin \alpha_B} = d_B \quad , \quad (4)$$

$$\beta_A + \beta_B = \gamma \quad . \quad (5)$$

其中, β_A 和 β_B 分别为太阳相对于 STEREO 卫星和 P 点之间的张角, γ 是 STEREO 卫星和太阳之间的夹角, d_A 和 d_B 分别为 STEREO 卫星距离太阳的距离。通过观测可以获得 d_A 、 d_B 、 γ , 并且由“时间-角距”数据点可以获得 α_A 和 α_B 的值,利用三角关系就可以计算 CME 传播到 P 点时的真实距离 r , 以及 β_A 和 β_B 。

很多前人的工作仅仅利用了空间某一个方向的信息,因此还必须借助各种运动模型^[57]。很显然, Liu 等人的三角测量法充分利用了 HI-1、HI-2 中的立体测量功能,识别和计算出同一 CME 结构参数,无需假定运动模型,能够较精确地测定 CME 远到 1 AU 距离处的传播方向以及真实的径向距离。这种方法对空间环境预报研究十分有益。

Webb 等人首次结合 LASCO、SMEI 以及 STEREO 日球成像仪的观测,综合研究了 ICME 的演化结构以及运动特征^[58]。这对了解大尺度的 ICME 的三维特征以及 ICME 与背景结构的相互作用都有重要意义。在他们的研究中, LASCO、SMEI 以及 STEREO 日球成

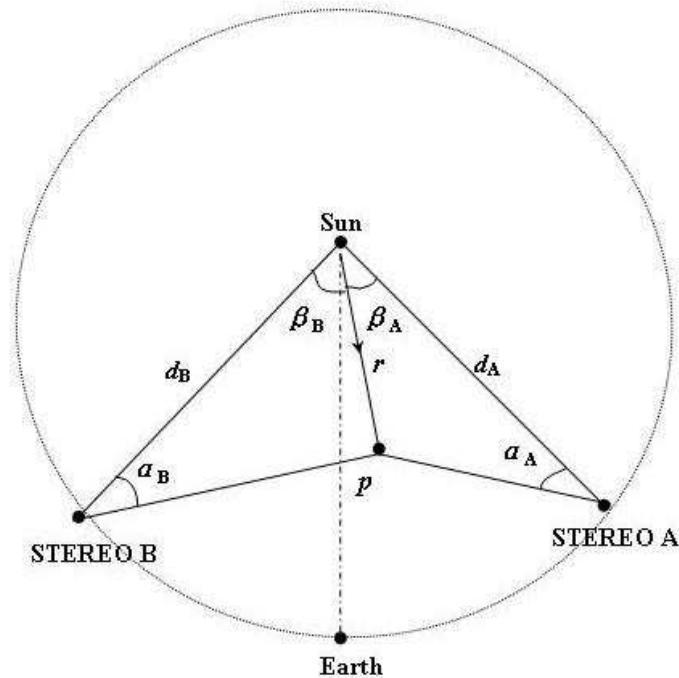


图3 黄道面上的三角几何关系图, 点线代表地球的公转轨道, 点虚线是太阳和地球之间的连线^[57]

像仪的图像被叠加在一起形成了清晰宽广的视场, 可以详细观测常规 CME 在更大尺度空间中的发展演化过程。测量计算手段也利用了“时间-角距”图和曲线。他们还利用了多种现有理论方法, 包括驱动运动学 (Drive/Drag Kinematic)、三维层析重构法 (3D Tomographic Reconstruction)、HAFv2 太阳风运动学模型 (Hakamada-Afasofu-Fry version2) 以及 ENLIL 磁流体力学模型分析法^[58], 分析研究了两个 ICME 的形态结构特征以及动力学演化参数。他们对这 4 种模型结果进行了分析比对, 发现它们所得到的 ICME 动力学演化形态特征基本一致。但同时作者提醒, 虽然这些结果相似, 但并不代表模型都是完善的, 一定要结合观测才能更好地改进模型和理解 ICME。

Howard 等人也是通过结合 SMEI 和 STEREO 日球成像仪的观测, 分析研究了 ICME, 在理论模型基础上推断出了 ICME 的运动特征及运动轨迹^[59]。从推导结果和近地空间设备监测的直接比较中, 作者首次得到了 ICME 的双成分结构: 一部分是 ICME 本身的类球状外形结构, 另一部分是来自太阳表面源区冕洞产生的 CIR 贡献。作者进一步推测这种 CME 结构应该很普遍。

值得推荐的还有 Lugaz 等人的工作, 他们不仅结合三维磁流体力学模拟、日球成像仪和 SMEI 的“时间-角距”测量数据, 推算出了两个 CME 传播的径向距离演化, 而且还对这两个 CME 随后的相互作用进行了模拟计算和观测比较^[60]。他们根据 CME 的观测特征对以往的 PP 模型和 $F\phi$ 模型进行了比较成功的修正或调和。Poomvises 等人利用射线跟踪模型

(raytrace model^[39]), 结合 SECCHI 极紫外成像仪、日冕仪以及日球成像仪等多台设备的同时观测数据, 获得了在消除投影效应下 CME 的“真实”径向传播特征, 进一步计算得到了 CME 的引导前沿和主体速度随时间、空间的演化特征, 指出它们在大约 $50 R_{\odot}$ 处开始保持常速度, 并且加速度演化在内日球空间范围 (可达 $90 R_{\odot}$) 可以用指数规律表示^[61]。这些结果对理解和发展更合理的 CME 动力学模型提供了重要的约束条件。

4 展 望

利用传统地面和空间设备, 包括极紫外成像和日冕仪设备, 只能从空间一个方向来观测和研究 CME 源区、发展和演化规律, CME 的真实运动速度、形态以及运动方向的判断都受到不同程度限制。因此人们根本无法完整连续地观测 CME 在大尺度行星际空间 (约 1 AU) 的立体发展, 更无法从实测上研究对地 CME, 因此过去对于重要太阳爆发事件的地球响应时间估算仅有约 9~10 h 左右的精度^[4]。

自 2006 年 STEREO 卫星成功发射以来, 提供了额外的两个空间视线方向的观测, 使得人类首次对太阳的全球面活动实现了三维的全天候监测。它成功地提供了 CME 的立体数据。人们能够通过三角测量技术和其它方法精确测量 CME 的速度和方向, 大大提高了到达地球时间的预测精度, 而且实现了 CME 从产生、传播到抵达地球甚至更远处的完整、可靠的实时监测。可以说, 由于 STEREO 日球成像仪的工作, 人们可以从实测上高效地检验各种理论模型和方法在大尺度空间演化上的合理性。不论是在太阳活动极小年期间还是目前的峰年阶段, STEREO 卫星都可以探测到大量的 CME 事件, 其中包括一些弱的抛射事件^[5]。

由于目前空间拉格朗日点附近的 SOHO 卫星仍然在提供观测, 因此人们事实上可以从空间三个不同的方向来观测太阳表面的各种活动, 精确判定该活动爆发是否会产生日冕磁场结构的重组及 CME 过程。例如, 最近 Shen 等人结合多波段日冕观测, 首次发现未遂的小尺度日珥爆发会逐渐成为成功日珥爆发, 并最终产生 CME 过程和完整信息^[62]。

因此, STEREO 卫星不仅为研究太阳物理本身提供了一个非常有特色的工具, 也为空间灾害天气监测和预警提供了更加详实可信的 CME 初始阶段的数据。这些成果为未来更准确地测量日冕结构及其磁场强度^[63-65] 和预报对地 CME 打下坚实的基础^[4, 66]。

参考文献:

- [1] Rouillard A P, Davies J A, et al. JGR, 2009, 114: A7
- [2] Gosling J T. JGR, 1993, 98: 18937
- [3] Rust D, et al. The Sun and Heliosphere in Three Dimensions. Report of the NASA Science Definition Team for the STEREO Mission, US: NASA HQ Document, 1997
- [4] Kaiser M L, Kucera T A, et al. Space Sci Rev, 2008, 136: 5
- [5] Howard R A, Moses J D, Vourlidas A, Newmark J S, Socker D G, Plunkett S P, et al. Space Sci Rev, 2008a, 136: 67

-
- [6] Howard R A, Thernisien A, Vourlidas A, Morrill J S, MacNiece P. AGU, 2007, SH42A: 04
- [7] Wülser J P, Lemen J R, Tarbell T D, Wolfson C J, Howard R A, Moses J D, et al. A&AS, 2000, 31: 0294
- [8] Eyles C J, Davis C J, Harrison R A, et al. Proc. SPIE, 2007, 6689: 668907
- [9] Eyles C J, Harrison R A, Davis C J, Waltham N R, Shaughnessy B M. Solar Phys, 2009, 254: 387
- [10] Harrison R A, Jackie A, Davies, et al. Solar Phys, 2009, 256: 219
- [11] 刘煜, 张洪起, 包曙东. 天文学进展, 2001, 19: 33
- [12] Driesman A, Hynes S, Cancro G. Space Sci Rev, 2007, 136: 17
- [13] Howard R A, et al. Geophysical Monograph Series, 2006, 165: 7
- [14] Yashiro S G, Michalek, Gopalswamy N. Ann. Geophys., 2008, 26: 3103
- [15] Schwenn R, Raymond J C, Alexander D, et al. Space Sci Rev, 2006, 123: 127
- [16] Brueckner G E, Howard R A, Koomen M J, et al. Solar Phys, 1995, 162: 357
- [17] Zhao X P, Plunkett S P, Liu W J. Geophys. Res, 2002, 107: 1223
- [18] Michalek G, Gopalswamy N, Yashiro S. ApJ. 2003, 584: 472
- [19] Xie H, Ofman L, Lawrence G J. Geophys. Res, 2004, 109: A03109
- [20] Krall J St, Cyr O C. ApJ, 2006, 652: 1740
- [21] Michalek G. Solar Phys, 2006, 237: 101
- [22] Pizzo V J, Biesecker D A. Geophys Res Lett, 2004, 31: L21802
- [23] Inhester B. arXiv: astro-ph/0612649, 2006
- [24] Sterling A C, Hudson H S. ApJ, 1997, 491: L55
- [25] Zarro D M, Sterling A C, Thompson B J, et al. ApJ, 1999, 520: L139
- [26] Harrison R A, Lyons M. A&A, 2000, 358: 1097
- [27] Harrison R A, Bryans P, Simnett G M, Lyons M. A&A, 2003, 400: 1071
- [28] Bewsher D, Harrison R A, Brown D S. A&A, 2008, 478: 897
- [29] Zhukov A N, Auchere F. A&A, 2004, 427: 705
- [30] Wang T J, et al. ApJ, 2002, 572: 580
- [31] Aschwanden M J. Annales Geophysicae, 2009a, 27: 3275
- [32] Colaninno R C, Vourlidas A. ApJ, 2009, 698: 852
- [33] Aschwanden M J, et al. ApJ, 2009b, 706: 376
- [34] Lepping R P, Jones J A, Burlaga L F. J. Geophys. Res. 1990, 95: 11957
- [35] Chen J. J. Geophys. Res. 1996, 101: 27499
- [36] Tripathi D, Bothmer V, Cremades H. A&A. 2004, 422: 337
- [37] Howard T A, Tappin S J. Solar Phys, 2008b, 252: 373
- [38] Trucco E, Verri A. Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, New Jersey: Prentice-Hall, 1998
- [39] Thernisien A, Vourlidas A, Howard R A. Solar Phys, 2009, 256: 111
- [40] Sheeley N R, Walters J H, Wang Y M, Howard R A. J. Geophys. Res, 1999, 104: 24739
- [41] Mierla M, Davila J, Thompson W, Inhester B, Srivastava N, Kramar M, et al. Solar Phys, 2008, 252: 385
- [42] Mierla M, Inhester B, Marqué C, Rodriguez L, et al. Solar Phys, 2009, 259: 123
- [43] Moran T G, Davila J. Science, 2004, 306: 66
- [44] Thernisien A F R, Howard R A, Vourlidas A. ApJ, 2006, 652: 763
- [45] Liewer P C, et al. AIP Conference Proceedings, 2010, 1216: 412
- [46] Curt C A, Pizzo V J, Biesecker D A. Solar Phys, 2009, 256: 167
- [47] Boursier Y, Lamy P, Llebaria A. Solar Phys, 2009, 256: 131
- [48] Wood B E, Howard R A. ApJ, 2009a, 702: 901
- [49] Wood B E, Howard R A, Thernisien A, et al. Solar Phys, 2009b, 259: 163
- [50] Harrison R A, et al. Solar Physics, 2008, 247: 171
- [51] Vourlidas A, Howard R A. ApJ, 2006, 642: 1216
- [52] Sheeley N R, et al. ApJ, 2008, 675: 853
- [53] Howard T A, Tappin S J. Space Sci Rev, 2009a, 147: 31
- [54] Morrill J S, et al. Solar Phys, 2009, 259: 179

- [55] Maloney S A, Gallagher P T, McAteer R T J. *Solar Phys*, 2009, 256: 149
- [56] Davies J A, et al. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L02102
- [57] Liu Y, Davies J A, Luhmann J G, Vourlidas A, Bale S D, Lin R P. *ApJ*, 2010, 710: L82
- [58] Webb D F, et al. *Solar Phys*, 2009, 256: 239
- [59] Howard T A, Tappin S J. *Space Science Reviews*, 2009b, 147: 89
- [60] Lugaz N, Vourlidas A, Roussev I I. *Annales Geophysicae*, 2009, 27: 3479
- [61] Poomvises W, Zhang J, Olmedo O. *ApJL*, 2010, 717: L159
- [62] Shen Y, Liu Y, Liu R. *RAA*, 2011, 11: 594
- [63] Liu Y, Lin H. *ApJ*, 2008, 680: 1496
- [64] Liu Y. *Annales Geophysicae*, 2009, 27: 2771
- [65] Liu Y, Lin H, Kuhn J. *IAU Symposium*, 2010, 264: 96
- [66] Aschwanden M J. *Living Rev. Solar Phys.*, 2011, 8: 5

Progress in the Observations of Coronal Mass Ejections by STEREO

ZHANG Xue-fei¹, LIU Yu¹, SHEN Yuan-deng^{1,2}, TIAN Zhan-jun^{1,2}

(1. *Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China;* 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: We briefly review the important observational results for CMEs based on the stereoscopic data by STEREO, including: (1) the study of the structural characteristic of CMEs evolution, by the determination of their mass from the EUV dimming observed by the two EUVI (EUV Imager) telescopes; (2) the study of the propagating characteristic of CMEs in three dimensions, by analyzing the stereo image pairs from the two coronagraphs on board STEREO; (3) the study of the ICMEs as well as their evolution and dynamics through the inner heliosphere to the Earth, by tracking their source regions on the solar surface and the following propagations in the heliosphere from the two HI (Heliospheric Imager) telescopes. Finally, we introduce the new methods for measuring the parameters of CMEs using triangulation techniques.

Key words: solar physics; STEREO; coronal mass ejection; triangulation