

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.03.01

# 日冕中 EUV 波的研究进展

岳 群<sup>1,2</sup>, 林 隽<sup>1</sup>, 张 力<sup>2</sup>, 吴 宁<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 云南 650011; 2. 云南大学 物理科学技术学院, 昆明 云南 650031;  
3. 云南师范大学 旅游地理学院, 昆明 云南 650031)

**摘要:** 日冕极紫外 (EUV) 波是 Thompson 等人 1998 年首先在 EIT 的观测资料中发现的, 在日冕中以几百 km/s 的速度传播的扰动现象, 在 1 h 之内扫过了大部分太阳表面, 所以这个现象开始被称为“EIT 波”。首先介绍了 EUV 波的研究背景; 然后介绍了 EUV 波的观测特征; 第 3 章分别介绍了 EUV 波与 Moreton 波、耀斑及 CME 的关系; 第 4 章介绍了从发现 EUV 波以来提出的各种理论和模型; 第 5 章讨论到目前为止已发现的 EUV 波成分: 一个较快的波在前面传播, 一个较慢的波在后面传播; 最后, 对 EUV 波研究的未来方向及发展趋势进行了总结和展望。

**关 键 词:** EUV 波; Moreton 波; 日冕物质抛射; 耀斑; 快模磁流体动力学波; 慢模磁流体动力学波

**中图分类号:** P182.6      **文献标识码:** A

## 1 引 言

1997 年 5 月 12 日太阳和日球层天文台 (Solar and Heliospheric Observatory, SOHO) 的远紫外成像望远镜 (Extreme ultraviolet Imaging Telescope, EIT)<sup>[1]</sup> 观测到了一个伴随日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejection, CME) 发生的波或扰动, 其传播范围覆盖了几乎整个可见的太阳表面, 以约 245 km/s 的速度传播到冕洞边界<sup>[2]</sup>。因为这种现象最初是由 EIT 观测到的, Thompson 等人<sup>[3]</sup> 在研究与 1997 年 5 月 12 日事件相似的 1997 年 4 月 7 日事件时, 将其称为“EIT 波”。之后的研究发现, 少部分 (7%) 的 EIT 波在它们产生的早期阶段显示了明锐的亮波前, 这个亮波前被称为“S”波<sup>[4]</sup>。后来, 许多仪器在 EUV 波段都观测到类似的扰动现象, 如日地关系天文台 (Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO) 的远紫外成像仪 (Extreme Ultraviolet Imager, EUVI)<sup>[5]</sup> 和太阳动力学天文台 (Solar Dynamics Observatory, SDO) 的大气成像组件 (Atmospheric Imaging Assembly, AIA)<sup>[6]</sup>。这一现象被

收稿日期: 2013-09-26; 修回日期: 2014-06-17

资助项目: 973 项目 (2011CB811403, 2013CBA01503); 国家基金项目 (11273055, 11333007); 中国科学院创新工程方向性项目 (KJCX2-EW-T07)

通讯作者: 岳群, qunyue@ynao.ac.cn

称为 EIT 波,并不是因为只有 EIT 望远镜能看到,而是作为一种纪念。现在大家普遍将这种在 EUV 波段观测到的扰动称为“EUV 波”。考虑到历史的原因,也照顾到参考文献的原文用词,我们在本文中将“EUV 波”和“EIT 波”等同使用。

Moreton 和他的同事在观测和研究 1959 年 11 月 30 日和 1960 年 6 月 25 日的事件时注意到在 H $\alpha$  偏带图像上出现的往外传播的波动现象,其速度约 500~1500 km/s<sup>[7]</sup>。由于这个扰动是 Moreton 等人首先发现的,所以被称为“Moreton 波”。Moreton 波是色球中的现象,但其传播速度比色球中的阿尔芬波速度大很多。为了解决这个问题,Uchida 提出 Moreton 波的日冕快激波起源模型:耀斑产生的快模激波在日冕中传播,其波前扫过色球,从而产生色球扰动,该扰动以日冕中的激波速度传播,因此比色球中的阿尔芬速度快很多<sup>[8]</sup>。这个模型成功地解释了 Moreton 波现象的特征和性质。实际上,Moreton 波本质上不属于色球中的波动,而是日冕中的磁流体动力学 (Magnetohydrodynamics, MHD) 激波向下扩张到色球引起的扰动。

由 Uchida 模型可以推测 Moreton 波在日冕中应该有对应体。根据这个推测,Thompson 等人<sup>[3]</sup>发现,在太阳表面发生 CME 时,EIT 波与 Moreton 波有关,但是它的形状和时间不能与 Moreton 波的特征完全对应。其他一些文章也证明了这个观点,如 Warmuth 等人<sup>[9]</sup>研究发现 Moreton 波的平均速度为 700 km/s,大于 EIT 波的平均速度 400 km/s,但他们认为减小的激波振幅可以直接解释它们的速度差异<sup>[10, 11]</sup>。在 Chen 等人<sup>[12, 13]</sup>的模拟中,EUV 波不是真正的波,而是磁力线逐个拉伸导致的密度增强区域的表现向外传播现象。有些文章也说明弥散的 EUV 波不是 Moreton 波的日冕对应体,并且它们在传播中是没有重合的<sup>[14]</sup>。

耀斑和 CME 都是太阳大气中的爆发现象。耀斑是发生在太阳表面局部区域中突然和大规模的能量释放过程。大耀斑释放的能量为  $10^{25}\sim 10^{26}$  J,中耀斑为  $10^{23}\sim 10^{24}$  J,小耀斑(亚耀斑)为  $10^{21}\sim 10^{22}$  J,微耀斑是  $10^{19}\sim 10^{20}$  J,释放能量  $\leq 10^{18}$  J 的为纳耀斑<sup>[15]</sup>。在耀斑爆发时会在不同的波段观测到大范围的辐射,包括微波、低频射电、可见和 EUV 辐射,软 X 射线、硬 X 射线,超过 10 MeV 的  $\gamma$  射线和  $\gamma$  射线连续谱<sup>[16]</sup>。开始人们认为大耀斑可能会产生 EUV 波,但是后来证明这是不可能的。Chen<sup>[17]</sup>的研究也证明,如果不伴随 CME,即使是强耀斑( $\geq M$  级)也不能产生 EUV 波。

CME 是在 20 世纪 70 年代观测到的,表现为在几分钟到几小时内从太阳向外抛射日冕物质(速度一般从几十 km/s 到 1000 km/s 以上),使很大范围的日冕(近于整个太阳表面)受到扰动,从而剧烈地改变了白光日冕的宏观形态和磁场位形<sup>[18]</sup>。它抛射的质量在  $10^{15}\sim 10^{16}$  g 之间,在太阳活动峰期每天发生 6 次以上,在活动极小期大约每两天发生一次<sup>[19]</sup>。CME 的发生伴随着许多其他相关现象,如太阳耀斑、EUV 波、Moreton 波等,而这些现象都不同程度地影响着地球的空间环境。

Chen<sup>[20]</sup>详细介绍了 CME 的观测特征和物理性质。一个典型的 CME 一般包含三部分结构:亮圆环、暗空腔、嵌入式亮核;但只有 30% 的 CME 有三部分结构。根据 CME 的形状又可分为窄 CME 和正常 CME,但它们之间的角宽并无明显的分界线。CME 的爆发包含各种能量的转换,不同能量之间有二次转换;部分为非热能转化为热能,最后辐射出去。但目前对 CME 爆发的具体物理过程仍然不清楚,要想建立成功的理论模型,应把观测和 MHD

理论相结合。CME 在爆发前处于平衡状态, 一般认为较大的 CME 所必需的能量来自日冕磁场。从力学平衡的观点看, 爆发之前的 CME 保持平衡是因为向下的磁张力和向上的磁压力平衡。不管压力增大还是张力减小都能引起 CME 在更高处找到平衡点, 一旦失去平衡 CME 就会爆发, 释放能量。积累的能量突然释放形成爆发之前, CME 可能有两种状态: (1) CME 爆发之前达到一个亚稳定状态; (2) CME 爆发之前处在一种接近失去平衡或不平衡的状态。第一种情况对小扰动是稳定的; 第二种情况, 相关磁场不稳定参数的任何改变都能直接触发爆发。文章中对 CME 和 EUV 波的关系也做了详细介绍, Chen<sup>[20]</sup> 认为 CME 前面的环和 EUV 波是重合的。从 EUV 波发现至今, 大多数研究者认为 CME 与 EUV 波的关系最密切<sup>[17, 20-23]</sup>。

尽管很多学者对 EUV 波进行了分析, 得出的结论也逐渐清晰, 但没有确定的结论。目前有几种解释 EUV 波的模型: (1) 快模 MHD 波模型<sup>[3, 11, 24]</sup>; (2) 磁力线连续拉伸模型<sup>[12, 13]</sup>; (3) 连续磁重联模型<sup>[23]</sup>; (4) 电流壳模型<sup>[25]</sup>; (5) 慢模波或孤立子波模型<sup>[26]</sup>。这 5 种模型将在第 4 章详细介绍。

解释 EUV 波的物理机制可分为三种: 波、伪波、混合波。在上述的 5 种模型中, 快模 MHD 波和慢模波或孤立子波模型支持波的机制; 支持伪波机制的模型是连续磁重联模型和电流壳模型, 认为“EUV 波”不是真正的波; 而磁力线连续拉伸模型则支持混合波机制, 这个机制试图将前两种观点联系起来。磁力线连续拉伸模型预测 EUV 波有两个成分: 一个较快, 在前面传播; 一个较慢, 在后面传播。而较慢的成分并不是真正的波。这是一种混合波的观点。目前, 已经有许多观测证实了 EUV 波有两个成分<sup>[27-33]</sup>。

## 2 EUV 波的特征

EUV 波的特征主要有: 很宽(约  $10^5$  km)、较亮、较弥散、近圆形的波前; 能在不到 1 h 的时间内穿过太阳半径大小的距离而保持连续; 在较低日冕层出现 ( $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$  K); 单脉冲, 借助 AIA 的高分辨率观测, 也发现了 EUV 波的多脉冲特征<sup>[34]</sup>; 不同 EUV 波事件的波速不同, 在  $50 \sim 700$  km/s 的范围内<sup>[35]</sup>, 最近的 AIA 观测显示其平均速度大于  $600$  km/s<sup>[36]</sup>。由于 EUV 波的传播接近圆形, 通常被认为是半各向同性的传播波前<sup>[37]</sup>, 后面紧跟随一个扩张暗区(如图 1 所示), 但不能通过强的磁场或中性线<sup>[3]</sup>。

除上面典型 EUV 波的特征以外, Wills-Davey 和 Attrill<sup>[37]</sup> 也总结了其他的特征, 如“S”波<sup>[4]</sup>, 但是利用有限的过渡区和日冕探测器 TRACE (Transition Region and Coronal Explorer<sup>[38]</sup>) 进行观测发现, 在 EUV 波产生的早期阶段并没有出现 S 波。其观测数据都显示所有的 EUV 波前最终都是宽的和弥散的, 波前的宽度是  $10^5$  km 的量级。观测到的“S”波较少, 并不是仪器分辨率的问题, 因为较高分辨率的 EUVI 望远镜的观测结果类似。更多的一些 EUV 波的特征如表 1<sup>[39]</sup> 所示。

有越来越多的证据表明 EUV 波的传播范围是色球之上  $1 \sim 2$  个密度标高(约  $7 \times 10^4$  km, 假定温度为  $1.5 \times 10^6$  K)<sup>[40]</sup>。EUV 亮波前本身的寿命是短暂的, 当波通过时, 当地的波前强

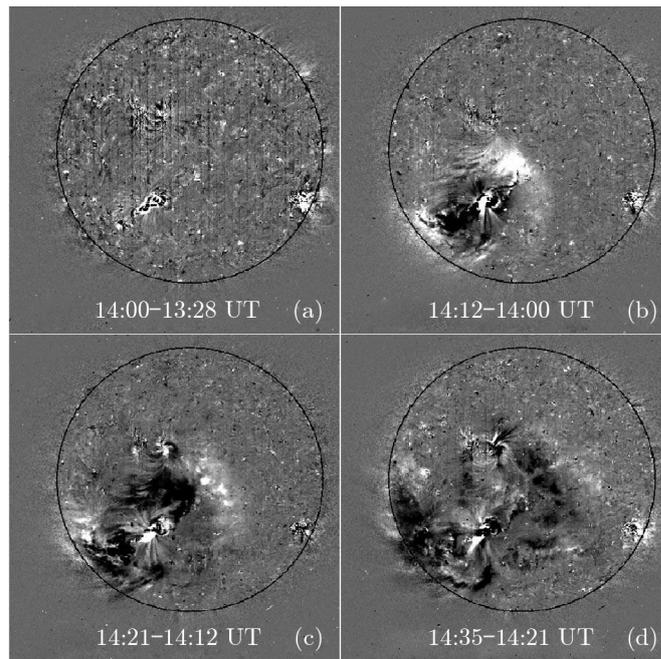


图 1 SOHO/EIT 动态相减图像

1997 年 4 月 7 日 CME 的演化。图中是 EUV 195 Å 的图像，时间分别是 (a) 14:00 UT, (b) 14:12 UT, (c) 14:21 UT, (d) 14:35 UT, 从它们中减去先前的图像。减去图像的时间是 13:28 UT<sup>[3]</sup>。

表 1 从最近的观测总结的 EUV 波的性质<sup>[39]</sup>

参量	数值
平均速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	200~400
初始速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	223~750
最终速/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	180~380
离源区的最大距离/ $10^3 \text{ km}$	350~850
宽度/ $10^3 \text{ km}$	20~250
加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$-2.0\times 10^3\sim 150$
磁声马赫数	1.08~1.4
强度增加 ( $I/I_0$ )	1.02~1.7
最高温度/ $10^6 \text{ K}$	2.8
增加的最大密度	1.009~1.3
辐射高度	$5\times 10^4\sim 10^5 \text{ km}$
3D 形状	近球状
与 CME 的关系	重合 (早期), 提前 (后期)
动能通量/ $10^{-7} \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$1.9\times 10^3$
辐射损失通量/ $10^{-7} \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$1.2\times 10^5$

度有几分钟的增加。这个强度的短暂增加表明温度或密度的临时增强, 但是很难估计温度和密度的具体影响。也有相当多的证据表明, EUV 波通过时局部物质的密度增加了。Warmuth 和 Mann<sup>[41]</sup> 测试了 6 个弥散亮波前事件, 这些事件的温度范围为  $1.5 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$  K, 望远镜上的不同滤光器观测到了相似的形态和亮度的增加; 因此, 他们认为只有压缩能产生这种观测现象。White 和 Thompson<sup>[42]</sup> 测试了一个 S 波出现时的 EUV 辐射和射电数据, 发现在两个波段都有亮波前。由于光学薄的热自由辐射仅有弱的温度依赖性 (正比于  $T^{1/2}$ ), 射电辐射的任何增强都有可能是由于密度增加造成的。Wills-Davey 和 Thompson<sup>[43]</sup> 在 TRACE 数据中发现一个波前在 195 Å 动态相减图像上显示了增亮, 但是在对应的 171 Å 动态相减图像上变暗, 表明在较热通道强度的增加, 但是在较冷的通道中有一个强度的减小。最终, 各种解释日冕 EUV 波的模型都倾向于通过密度增加 (等离子体压缩) 和加热引起的强度变化来分析 EUV 波的特征。

还有研究发现 EUV 亮波前本身在扩张的同时有一个转动<sup>[23]</sup>。Attrill 等人<sup>[23]</sup> 对 1997 年 4 月 7 日事件研究分析后发现, 沿亮波前的两个不同位置处有约  $22^\circ$  的转动, 表明了整个日冕波的连续转动。而这些观测到的亮波前的转动, 与相关的暗条爆发显示的转动以及 CME 源区的磁螺度一致。

EUV 波的探测涉及整个 EUV 范围, 除了 195 Å, 还包含 171 Å (TRACE), 175 Å (SPICE 物理射电天文学研究国际中心的网络远程望远镜, SPIRIT<sup>[44]</sup>), 284 Å (EIT), 304 Å (EUVI)。全球性的日冕波也已经被地球同步运转环境卫星的 X 射线望远镜 (GOES/SXI<sup>[45]</sup>) 在软 X 射线波段观测到。最近, 日本日出卫星上的 X 射线望远镜 (Hinode/XRT<sup>[46]</sup>) 也观测到了 EUV 波, 且在 X 射线波段的扰动现象特别明显。不过先前的阳光卫星上的软 X 射线望远镜 (Yohkoh/SXT<sup>[47]</sup>) 没有观测到弥散日冕波, 仅有类似于“S 波”的扰动被观测到。Hinode/XRT 也观测到了类似的“S 波”。有学者认为这个差异是由于波的平均温度引起的, 如弥散 EUV 波太冷, 则不可能在 Yohkoh/SXT 中观测到。最近由 GOES/SXI 和 Hinode/XRT 观测到的全球性的日冕波表明, 这个差异是由于这些新仪器改进了动力学范围<sup>[37]</sup> 导致的。

### 3 EUV 波与太阳内其他现象的关系

#### 3.1 EUV 波与 Moreton 波的关系

Thompson 等人<sup>[2, 3]</sup> 发现 EIT 波后便认为它就是 Moreton 波向日冕对应波, 而且在同一事件的同一时刻发现明锐的 EIT 波前和 Moreton 波前重合。Wills-Davey 等人<sup>[26]</sup> 总结了 Moreton 波与 EUV 波的共同特征: 单脉冲现象, 与 CME 强相关, 都是太阳大气层中大尺度的扰动, EUV 波能产生磁环振荡, Moreton 波与瞬变暗条相关。他们也总结了两者之间的差异: Moreton 波前比 EUV 波前窄, 寿命 (小于 10 min) 比 EUV 波短; 传播速度 (400~2000 km/s) 是部分 EUV 波的 2~3 倍, 能用快模波很好地解释。Wills-Davey 和 Attrill<sup>[37]</sup> 还证实大多数 EUV 波是宽和弥散的, 不像色球中观测到的明锐的、圆弧状的激波

前。这些差异,都意味着 EUV 波不是 Moreton 波的日冕对应体<sup>[2, 3, 9-11]</sup>。

Warmuth 等人<sup>[9]</sup>研究了 1997 年 11 月 3 日 (E1) 和 1998 年 5 月 2 日 (E2) 的两个事件。他们发现 E2 与亮的部分晕状 CME 明显相关 (见图 2), 而很难确定 E1 是否与 CME 相关。图 2 是 E2 中 Moreton 波和 EIT 波的部分放大图, 图中两个波出现的时间很接近, 它们的观测特征非常相似, 而且两个波的传播距离随时间的变化也比较接近, 但是它们的平均速度则有些不同: Moreton 波的平均速度为 700 km/s, EIT 波的平均速度为 400 km/s。Warmuth 等人<sup>[10, 11]</sup>研究了另外 12 个 Moreton 波事件, 进一步验证了 Moreton 波和 EIT 波前有重合, 并且传播距离随时间的变化方式很接近。

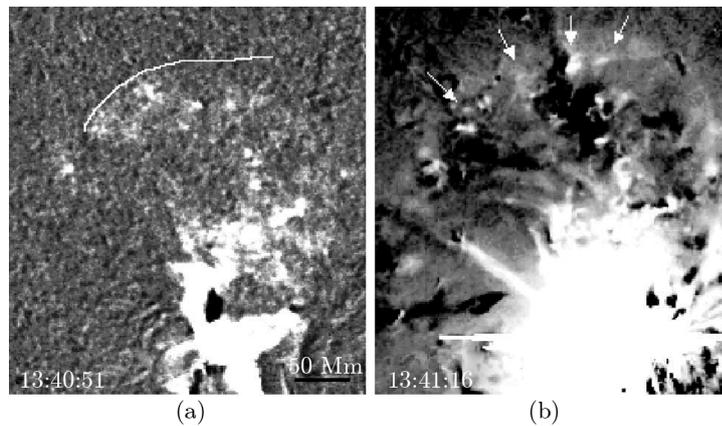


图 2 1998 年 5 月 2 日事件局部放大的动态相减图像<sup>[9]</sup>

(a)  $H\alpha$  图像; (b) EIT 图像。请注意 EIT 的时间仅精确到约 15 s。每个图像减去前面的图像。箭头表示 EIT 波前。前面边缘的位置在左图中标出。

Warmuth 等人<sup>[10, 11]</sup>发现那些伴随耀斑出现的波动现象——耀斑波, 都是减速的。它们在 EUV 和  $H\alpha$  波段的观测特征是不同的: 在 EUV 波段观测到的传播距离比在  $H\alpha$  波段的距离大, 并且在 EUV 波段传播的后期其速度已明显减小, 而此时在  $H\alpha$  波段已观测不到; 所以耀斑波在 EUV 波段观测到的平均速度小于  $H\alpha$  波段的平均速度。他们认为激波振幅的减小引起的减速可以直接解释两者之间的速度差异; 因为非线性激波的振幅较大, 且它的速度依赖于振幅。在传播过程中, 激波的前边缘比尾部移动得快, 还由于几何膨胀, 振幅会减小, 导致减速<sup>[48]</sup>。Thalmann 等人<sup>[49]</sup>也说明 EUV 波与 Moreton 波几乎同时观测到, 而且两个波前之间的距离在标准的误差范围之内。

在 Chen 等人<sup>[12, 13]</sup>的模拟中, 前面传播的快波前被解释为快模 MHD 波, 它的边缘扫过色球产生了 Moreton 波; 后面的慢波被解释为 EUV 波 (不是真正的波), 是磁通量绳上升导致的连续拉伸的磁力线在外边界产生的连续的密度增强。在他们的模型中, EUV 波是日冕 Moreton 波后面的一种表观传播, 这不仅能产生 EUV 波的慢速度, 而且能解释 EUV 波宽、弥散的特征。这说明 EUV 波不是日冕 Moreton 波。

Eto 等人<sup>[14]</sup>介绍了一个比较好的 EIT 波和 Moreton 波都被观测到的例子, 但遗憾的

是两者不同时。先观测到 Moreton 波, 然后再观测到 EIT 波; 但在观测到 EIT 波期间, 有一个宁静区的暗条出现振荡, 假定该振荡源于 Moreton 波对应的日冕波的话, 日冕波并没有出现减速, 而且位于 EIT 波的前方。Asai 等人<sup>[50]</sup>介绍了 Moreton 波前与明锐的快 EUV 波前有重合, 但是有一个慢 EUV 波在这个快的 EUV 波后面, 他们认为慢 EUV 波是典型的“EIT 波”, 快 EUV 波可能是 Chen 和 Wu<sup>[30]</sup>指出的快 MHD 波。这说明 EUV 波不同于快模 MHD 波, 其他的一些文章也支持这个观点<sup>[51, 52]</sup>。

### 3.2 EUV 波与耀斑的关系

自从 EUV 波被发现之后, 它的源区一直存在争论。早期研究者们提出 EUV 波是由耀斑触发, 而近年, 通常认为 CME 是最有可能触发 EUV 波的源。Cliver 等人<sup>[53]</sup>发现, 约 50% 的 EUV 波与小的 (B 级或更小) X 射线耀斑相关 (在太阳活动的高峰时期每天能发生几十次), 这一结果不支持由耀斑触发的 EUV 波的模型。同时, 他们的研究也表明与 EUV 波相关的 CME 的空间尺度 (平均尺度  $165^\circ$ ) 比与 EUV 波无关的 CME 的尺度 (平均尺度  $61^\circ$ ) 要大得多。

Chen<sup>[17]</sup>选择了 1997 和 2005 年观测到的 46 个高能耀斑 ( $\geq M$  级), 发现其中 14 个没有 CME 的耀斑都没有伴随 EUV 波和 II 型射电暴, 另外 32 个与耀斑有关或无关的 CME 事件中的 13 个 (约 41%) 与 EUV 波和大的扩张暗区有关。2005 年 1 月 15 日的 5 个 M 级以上的耀斑中有两个伴随 CME, 且从这两个与 CME 有关的耀斑的极紫外图像上, 可以清楚地观测到 EUV 波和扩张的暗区。这表明 EUV 波不是太阳耀斑产生的爆震波, 而且仅当耀斑与 CME 有关时才能观测到 EUV 波和大尺度的扩张暗区。一般来说, 与 CME 相关的耀斑通常是双带耀斑, CSHKP (Carmichael<sup>[54]</sup>, Sturrock<sup>[55]</sup>, Hirayama<sup>[56]</sup>, Kopp 和 Pneuman<sup>[57]</sup>) 模型能很好地解释这个现象; 无 CME 的耀斑通常是致密耀斑, 产生的原因可能是新浮磁流和日冕磁场发生磁重联或日冕环之间相互作用。Chen<sup>[17]</sup>还注意到无 CME 耀斑对应局域磁重组而不是 CME 中的全球性磁重组, 这时仅局域增亮, 局域暗区能观测到。

Kay 等人<sup>[58]</sup>研究了与 CME 相关和无关的耀斑的特征, 他们从这些事件中辨认出的 11 个 EIT 波全部与 CME 相关, 而且 EIT 波的发生与 CME 的速度 (约 200~1800 km/s) 无关, 似乎也与高数值强度的耀斑或有极大上升或衰减时间的耀斑无关。

Kumar 和 Manoharan<sup>[59]</sup>对 2011 年 3 月 25 日与 M 级耀斑和 EUV 波相关的等离子体团抛射的多波段资料进行了分析。这个事件清楚地显示了等离子体团的形成, 以及抛射后紧跟着产生一个强耀斑的过程, 等离子体团的形成比耀斑的发生早约 9 min。他们注意到, 在处于脉冲式加速阶段的等离子体团边缘的前面形成了日冕激波, 并且由一个较快 (912 km/s) 和较慢 (341 km/s) 的波组成。快波是 Chen 等人<sup>[12, 13]</sup>模拟中的快模 MHD 波, 而慢波则有多种可能。SDO/AIA 335 Å 动态相减的电影和空间-时间图则显示了等离子体团紧跟在慢波之后, 一直到 23:18 UT 等离子体团消失。在这个过程中耀斑的峰值时间 (23:13—23:14 UT) 非常接近波的起始时间 (23:15:31 UT), 但是波的初始位置离耀斑位置较远 (约  $0.23 R_\odot$ )。可见 EUV 波的形成与大尺度磁场结构的演化是密切相关的, 触发 EUV 波的不是耀斑, 而是等离子体团的抛射, 即 CME。

### 3.3 EUV 波与 CME 的关系

Chen<sup>[20]</sup> 详细介绍了 CME 的内部结构。最初 CME 前面的环被认为是一个波,是由太阳大气底层耀斑的压力脉冲引发的快模 MHD 波,但后来因与观测结果不符合,这个观点被放弃了<sup>[21, 60, 61]</sup>。

为了分析 EUV 波与 CME 之间的关系,Chen<sup>[63]</sup> 选择了 1997 年 9 月 9 日的 CME 事件和 Thompson 与 Myers<sup>[35]</sup> 统计的 1997 年 3 月到 1998 年 7 月之间的 176 个“EIT 波”事件中的 38 个太阳边缘事件。比较了 1997 年 9 月 9 日的 CME 在 19:44:27 UT 和 20:00:49 UT 的白光图像与 19:44:44 UT 和 20:00:14 UT EIT 195 Å 图像(见图 3),发现 CME 前面的环与 EUV 波前重合,扩张的 EUV 暗区与 CME 的空腔重合。他还指出 CME 前面的环应该与 EUV 波的形成机制一致,都是磁环的连续拉伸引起的运动中的密度增强。这个分析表明 EUV 波与 CME 密切相关。

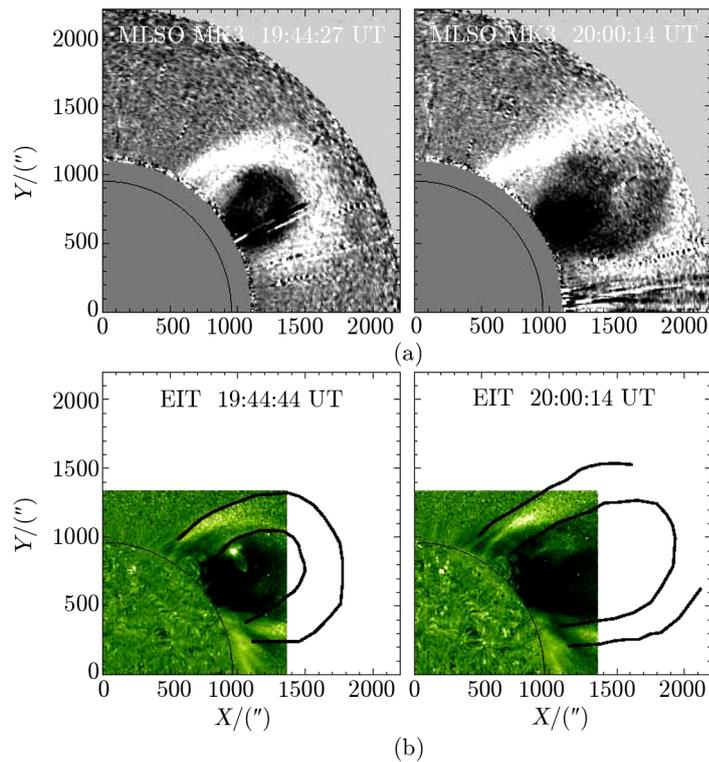


图 3 CME 前面的环和 EUV 波的空间位置的比较<sup>[63]</sup>

(a) 莫纳罗亚山太阳天文台上的马克 III K 日冕光度计 [Mauna Loa Solar Observatory (MLSO)/Mark-III K-Coronameter (MK3)<sup>[62]</sup>] 在 19:44:27 UT 和 20:00:49 UT 观测的白光 CME 爆发的两个快照; (b) EIT 在 19:44:44 UT 和 20:00:14 UT 观测的 EUV 波传播的 Fe XII 195 Å 图像。

而 Veronig 等人<sup>[64]</sup> 研究了 EUVI 观测到的 2010 年 1 月 17 日的事件。在这个事件的 EUVI 195 Å 的图像中清楚地显示出,在 CME 爆发环的前面存在一个圆顶状的波前(我们称为圆顶波),且它的扩张范围大于 CME 结构的范围。他们认为观测到的 EUV 波前是这个圆

顶波而不是 CME 本身。圆顶波的扩张是 CME 驱动的, 当 CME 横向扩张停止后波自然能够自由传播。他们指出这个圆顶波就是大振幅的快模 MHD 波。

Zhao 等人<sup>[65]</sup>研究了 EUVI 观测到的 2010 年 1 月 17 日的 CME-EUV 波事件的形态和运动特征。他们分析了波在太阳表面沿不同路径的传播, 得出在主要传播方向(最快传播方向), CME 的速度为  $(577 \pm 33)$  km/s, EUV 波的速度为  $(329 \pm 20)$  km/s。EUV 波在太阳表面之上  $7.2 \times 10^4$  km 和  $4.6 \times 10^4$  km 高度处的传播速度和 Alfvén 速度的相关系数分别是 0.66 和 0.58。他们还比较了 EUV 波的速度与垂直和水平的快模波波速, 发现它们成正相关, 且 EUV 波较快。这个结果与 Yang 和 Chen<sup>[66]</sup>发现的 EUV 波速与局域磁场强度成负相关的结果是相反的。Zhao 等人的研究表明 EUV 波不是 CME 的前环, 但支持 EUV 波是快磁声波。

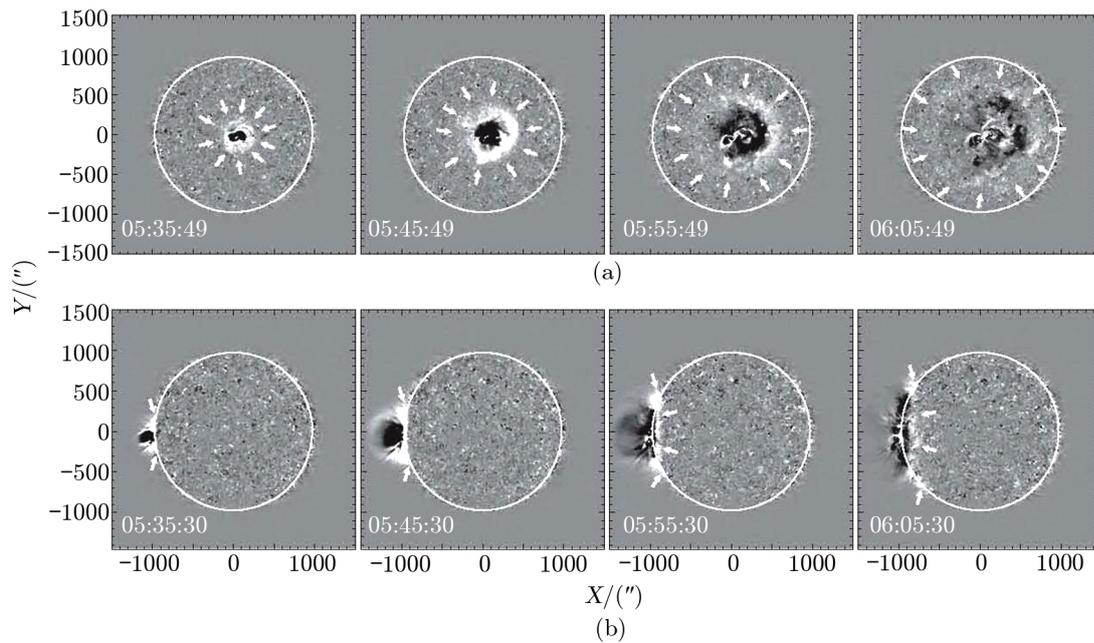


图 4 2009 年 2 月 13 日的 EUV 波事件<sup>[65]</sup>

(a) 日冕波(箭头标记)的太阳表面观测 STEREO-B; (b) 边缘观测 STEREO-A(下图)。EUVI 195 Å 波段的中值滤波器的动态相减图像序列, 时间分辨率是 10 min。

Kienreich 等人<sup>[67]</sup>利用 STEREO 对 2009 年 2 月 13 日事件进行观测(此时两个 STEREO 航天器与太阳连线之间的夹角为  $90^\circ$ ), 得到了 EUV 波和 CME 之间较精确的关系。从 STEREO-B 观察源活动区在太阳表面中心, 从 STEREO-A 观察源活动区在东部边缘(见图 4)。这是一个理想的组合, 可以同时观测波(太阳表面视点)和 CME 的运动性质(边缘视点)。他们发现波和 CME 最初是重合的, 但很快波就从 CME 的侧面分离出来; 这个现象也被 Patsourakos 等人<sup>[40]</sup>注意到。在这个事件中, EUV 波在离太阳表面  $8 \times 10^4 \sim 10^5$  km 远的位置进行传播, 速度约为 260 km/s; 而 CME 开始膨胀的高度约为

$9 \times 10^4$  km。波从 CME 前方分离出来的过程,最近也在 AIA 高分辨率观测的几个事件中被证实<sup>[68, 69]</sup>。

由于 AIA 的高分辨率观测,人们发现了许多有研究价值的事件,如 2011 年 6 月 7 日<sup>[69]</sup>、2010 年 7 月 27 日<sup>[30]</sup>、2010 年 6 月 13 日<sup>[68, 70]</sup> 的事件等。Downs 等人<sup>[70]</sup> 对 2010 年 6 月 13 日的 EUV 波事件进行了全面的观测和模拟分析。他们做了爆发和相关 EUV 波随时间演化的三维磁流体力学模拟,并把模拟的结果与 AIA 的观测结果进行比较,尽管有稍微的不同,但基本上是一致的。他们发现最外面的传播扰动(外层 EUV 波)显示了近似半球形各向同性扩张的特征,并且在 193 Å 和 211 Å 的单色像上表现出强度的增强,在 171 Å 的单色像上表现出强度的减弱;而当这个扰动通过之后,在 193 Å 和 211 Å 的单色像上表现出强度的减弱,在 171 Å 的单色像上表现出强度的增加。以上两个明显特征表明加热和冷却循环过程的短暂发生,同时在不同的磁场条件下传播状况是不同的。他们还注意到 EUV 波从 CME 的相关结构中分离出来,其速度(约 200~350 km/s) 是时间的连续函数。这些现象都表明外层的 EUV 波是快模波。他们也观测到了次级波前与外层 EUV 波不同的特征。次级波前是密度改变的结果,它的传播区域只有很小的改变(局限于纬度  $-45^\circ \sim 0^\circ$ )。他们认为次级波前可能是 CME 结构的一部分。

以上事件都表明 CME 是 EUV 波的驱动源,但是无法确定 EUV 波是否与 CME 前面的环一一对应。

## 4 EUV 波的理论模型

从 EIT 到 AIA 时代,观测图像清楚地显示了太阳活动爆发的过程及其所产生的扰动。EUV 波就是其中的一种扰动,介绍它的文章层出不穷,但是由于不同的人对观测事件的分析角度及方法不同,得出的结论不尽相同,所以人们对其本质特征的理解必然有所不同。解释这些观测现象,探索其中的物理背景非常必要。下面介绍在发现 EUV 波之后,学者们提出的几个理论模型。

### 4.1 快模 MHD 波模型

对 EUV 波最早的解释是快模波或日冕 Moreton 波,许多理论工作都支持这个解释<sup>[2, 3, 9-11, 39, 48, 71]</sup>。太阳大气中的物质都是等离子体,其中有四种模式的波运动,被四种不同的力驱动:磁张力和科里奥利力分别驱动 Alfvén 波和惯性波;磁压力、等离子体压力和重力分别能产生压缩 Alfvén 波、声波和重力波,但当共同作用时这 3 个力仅产生两种磁声波。重力不存在时产生磁声波,当磁场消失时产生声重力波。当然在太阳大气中磁场是不可能消失的,所以当忽略重力和科里奥利力时,得到磁声波,速度为<sup>[72]</sup>:

$$\omega/k = \left( \frac{1}{2}(c_s^2 + v_A^2) \pm \frac{1}{2}\sqrt{c_s^4 + v_A^4 - 2c_s^2v_A^2 \cos 2\theta_B} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

其中  $\omega$  是频率,  $k$  是波数,  $c_s = (\gamma k_B T)/m$  是声速,  $v_A = B/(\mu\rho_0)^{1/2}$  是 Alfvén 速度,  $\theta_B$  是波速与磁场的夹角。当取正号时就是快磁声波,取负号时是慢磁声波, Alfvén 波速在两者之间。

当取负号时通过磁场的传播速度 ( $\theta_B$  接近  $1/2 \pi$ ) 是 0, 也就是说慢波不能垂直穿过磁场。

要解释 EUV 波现象, 有些人认为选择的波必须是压缩 MHD 波, 因为它能无阻碍地穿过磁化等离子体。慢波的传播受磁场方向限制, 所以快模 MHD 波是最合适的选择<sup>[26]</sup>。当然现在已经有许多观测证明 EUV 波是 MHD 波<sup>[3, 9-11, 24, 43, 73]</sup>。

Chen 和 Fang<sup>[74]</sup> 总结了支持和不支持快模 MHD 波模型的一些证据。其中支持的证据表明: 从理论上, CME/耀斑突然爆发, 产生强烈的扰动, 然后通过磁力线以快模波的形式传播; 从观测上看, EIT 望远镜只观测到一个波, 能与理论预期很好地匹配。

而不支持这个模型的证据包括<sup>[74]</sup>: (1) EIT 望远镜的时间分辨率 (12~15 min) 太低, 不足以追踪低日冕的快模波; (2) EUV 波前角宽度大于  $180^\circ$ , Moreton 波很少大于  $90^\circ$ ; (3) Zhang 等人<sup>[75]</sup> 的统计研究表明, EUV 波的速度一般为 Moreton 波速度的  $1/3$  甚至更低; (4) EUV 波速能低到几十 km/s, 比日冕中的声速还低; (5) Delannée 和 Aulanier<sup>[76]</sup> 发现 EUV 波前在磁分界面上停止, 而快模波能穿过磁分界面; (6) Attrill 等人<sup>[23]</sup> 发现 EUV 波向外传播, 其强度的峰值位置的转动方向与爆发暗条的方向 (顺时针或逆时针) 一致; (7) Yang 和 Chen<sup>[66]</sup> 发现 EUV 波速与当地的磁场强度成负相关, 这不符合快模波的预期; (8) Chen 等人<sup>[77]</sup> 发现 EUV 波后的扩张暗区边界存在不寻常的谱线增宽; (9) Chen 等人<sup>[78]</sup> 发现 EUV 波与小冕洞有相互作用, 冕洞中的上升流速度和光谱宽度要至少在几个小时之后才能减小, 表明开放场线被挤压变形到另一个方向, 而不是由于快模波的产生使它振荡; (10) EUV 波前离开源区边界后有一个加速的过程; (11) Chen<sup>[63]</sup> 发现 EUV 波前与 CME 的前环重合。

Kienreich 等人<sup>[79]</sup> 介绍了在 2010 年 4 月 28 日—29 日的 8 h 内, 4 个同源 EUV 波在相同的活动区沿相同的方向爆发的系列事件。他们计算出这 4 个波的速度约在 220~340 km/s 内, 波的最大密度相对于初始密度的变化  $X_c$  分别是 1.07、1.05、1.07、1.11。他们还计算了宁静太阳中 4 个波相应的磁声马赫数  $M_{ms}$  分别是 1.06、1.04、1.05、1.09。他们对 4 个波的  $M_{ms}$  和速度进行了分析, 发现它们之间的相关系数是 0.99。因为  $M_{ms} = v/v_{ms}$ <sup>[80]</sup> ( $v$  是日冕波的速度,  $v_{ms} = \sqrt{c_s^2 + v_A^2}$  是快磁声波的速度), 所以  $M_{ms}$  和速度的相关性表明观测到的 EUV 波实际上是快磁声波。

Olmedo 等人<sup>[81]</sup> 研究了 2011 年 2 月 15 日与 CME 和耀斑相关的 EUV 波事件, 当两个 STEREO 子卫星与 SDO 首次对太阳进行了  $360^\circ$  的观测, 发现波在冕洞边界的反射并且穿过了冕洞。他们得到波在靠近冕洞时的波速为 760 km/s, 而进入冕洞的部分传播速度为 780 km/s, 在冕洞边界反射后的波速为 280 km/s; 这个结果对 EUV 波是快模波的观点提供了有力支持。Kwon 等人<sup>[82]</sup> 介绍了 2011 年 8 月 4 日一个与 CME 相关的快磁声波的白光观测, 数据由 STEREO/SECCHI/COR1 日冕仪获得。他们的观测结果表明, 最后静止的 EUV 扰动并不是停止的波前, 而是扫过磁分界面的束缚在冕流中的快磁声波。

最近的一些研究都支持 EUV 波是快模波<sup>[39, 48, 70, 71, 83]</sup>。Patsourakos 和 Vourlidis<sup>[39]</sup> 总结了 EUV 波表现出的波的特征: 在它们的早期阶段有一个明显的减速过程或几乎一直以常速传播<sup>[48]</sup>; 如果不考虑它们的初速度或减速阶段, 这些波最终在一个非常窄的速度范围 (180~380 km/s) 内传播<sup>[41, 73]</sup>; 波的半峰全宽随时间的增加表明了它的弥散性, 这是波的典型特征<sup>[84]</sup>; 另外的一些数值模拟和观测<sup>[85-87]</sup> 表明 EUV 波能从冕洞的边界反射回来。这些

性质都表明 EUV 波的运动性质与快模波相符。

#### 4.2 磁力线连续拉伸模型

Chen 等人<sup>[12, 13]</sup>在二维的 MHD 数值模拟中发现,“EUV 波”是运动中的密度明显增强的区域,它实际上是由跨过爆发磁通量绳的闭合磁力线的连续拉伸导致的,不是真正的波。

他们给出的 EUV 波的机制如图 5 所示<sup>[13]</sup>:随着磁通量绳上升,A 点附近的场线最先发生变形(即场线的拉伸)。扰动以快模波或激波的相速度传播,而大振幅变形本身能通过磁力线向上传播到达 B 点,也能沿磁力线向下以波的群速度运动到 C 点。然后,EUV 波前出现在 C 点。其次,B 点的变形向上移动,同时向下以波的群速传到 D 点。这样,一个新的 EUV 波前出现在 D 点,尽管快模波从 C 点出发已经以相速度通过 D 点。因此,连续开放的磁力线在外边界产生连续的密度增强,连续的 EUV 波前形成,而相应的内部区域的等离子体被疏散,密度减小,形成暗区。

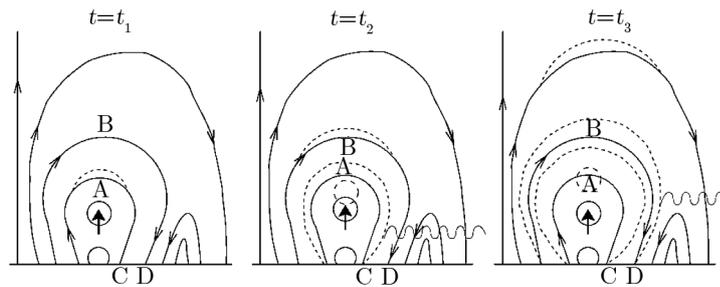


图 5 EIT 波前从 C 到 D 点的传播,这里上升的流量绳是连续开放的所有磁场线的初始源<sup>[13]</sup>

实线代表初始结构;虚线对应每个时间的新结构;波浪线代表从 EIT 波前发射的快模波。Moreton 波,在 EIT 波前面,图中没有显示。

为了简单起见,他们假设耀斑附近的磁力线是均匀的同轴圆,这样,D 和 C 点附近变形之间的时间滞后是  $\Delta t = AB/v_f + (BD - AC)/v_A$ ,其中  $v_f = (v_A^2 + c_s^2)^{1/2}$  和  $v_A$  分别是通过和沿着磁力线的群速,而  $v_A$  是 Alfvén 速度,  $c_s$  是声速。他们推导出 EUV 波的表现速度是  $v_{\text{EUV}} = CD/\Delta t = 1/(1/v_f + \pi/2v_A) \approx 0.34v_f$  (假设  $v_A = 0.8v_f$ )。因为日冕 Moreton 波(弱 MHD 激波)大约以速度  $v_f$  传播,这个解析解表明 EIT 波以与它们对应的 Moreton 波速度的 34% 移动,这大体与观测一致。在活动区以外,  $v_f$  较小,日冕磁力线是扁长或部分开放的而不是半圆。因此,当  $\Delta t$  较大时(磁力线会无限延伸趋向于变成完全开放的磁力线),EIT 波在宁静区比在耀斑附近移动得慢,甚至停止在冕洞边界(有开放的磁力线),如 Thompson 等人<sup>[3]</sup>的文章中所说明的。

如果被拉伸的磁力线是半圆的,那么 EUV 波速大约是快模波速的 1/3。当 EUV 波遇到另一个活动区或开放场(都有磁分界面)时,EUV 波就停止在磁分界面。这个模型能解释 EUV 波的主要特征,如低速度、弥散波前、磁界面处的驻留。这个模型也预言在高时间分辨率的情况下应该能观测到两种现象:一个是有明锐波前的 Moreton 波的日冕对应物,另一个是弥散“EUV 波”。

Dai 等人<sup>[31]</sup>介绍了利用 EUVI 和 AIA 对 2011 年 1 月 27 日的 NOAA 活动区 11149 的

EUV 波前事件的观测。他们的分析表明, 当主波前遇到大的日冕环系统时, 一个次级弱波前从主波前出发并分离出来, 然后两个波前独自演化。这个主波前 (EUV 波) 被认为是非波的 CME 成分, 可以用磁力线连续拉伸模型来解释; 次级弱波前可能是线性 MHD 波。Kumar 等人<sup>[32]</sup> 对 2010 年 10 月 16 日在活动区 NOAA 11112 中发生的 M2.9/1N 耀斑进行了多波段观测, 在 AIA 212 Å EUV 图像上显示出, 一个慢波 (速度从约 416 km/s 减小到约 166 km/s) 前面有一个较快的日冕波 (速度从约 1390 km/s 减小到约 830 km/s) 往西部边缘传播。这些观测都表明两个波成分的存在。同时, 其他一些文章<sup>[33, 66, 77, 78]</sup> 的结论也支持这个模型。

### 4.3 连续磁重联模型

Attrill 等人<sup>[23]</sup> 通过研究 1997 年 5 月 12 日和 1997 年 4 月 7 日的 EUV 波事件, 提出一个新的机制来解释 EUV 波。他们认为, 扩张中的 CME 的磁场被拉伸并与方向恰当的“开放”或“闭合”磁结构重联, 其引起的加热产生弥散 EUV 波前。

磁重联模型所描述的过程如图 6 所示。扩张的 CME 结构 (点线) 与方向恰当的宁静太阳磁环 (虚线) 重联。这些重联在 A、B、C 点产生增亮, 并且产生更长的磁力线 (实线), 因此有一个较大体积的扩张的 CME 空腔 (增亮 C 从 CME 足点分离)。在闭合的宁静太阳磁环 (虚线) 内, 先前存在的等离子体突然释放到一个较大的体积内 (CME 空腔), 因此, 我们观测到的深度暗区 (阴影区) 仅在增亮发生之后发展。对于大的深度暗区, 他们认为是磁通量绳与宁静太阳磁环重联的结果。第一次重联之后, 磁结构的继续扩张驱动了之后重联的发生, 继而出现双增亮。前面的弥散亮波前看起来在传播, 实际上是由磁通量绳与宁静太阳磁环的连续重联的逐渐远离形成的, 并且产生了许多增亮 A'、B'、C'。这表明 CME 核心决定了 EIT 波的整体运动。

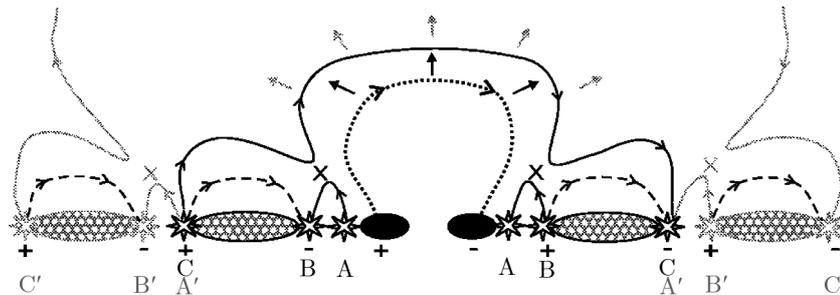


图 6 用于解释伴随双增亮和两种变暗的亮、弥散日冕“波” (EUV 波) 的产生的磁重联模型<sup>[23]</sup>

扩张中的 CME (点线) 与方向恰当的宁静太阳磁环 (虚线) 重联, 取代了扩张 CME 的足点 (实线)。十字标记了磁重联的发生区域。点/虚线显示了爆发前的磁结构, 黑 (灰) 实线显示了第一次 (随后) 重联的结果。

这个模型解释了双增亮波前和大的深度暗区, 而深度暗区对应于爆发磁通量绳扩张的中心足点。Delannée<sup>[88]</sup> 对 1997 年 5 月 12 日 EUV 事件的磁场进行了外推, 他们得出的结论是: 磁通量绳与磁环的连续重联会停止在足点附近, 不会向远处传播。他们认为, 所有这些特征, 即活动区周围的磁场拓扑结构、扩张磁通量管的可能运动, 以及磁毯中也没有出现规则的变化, 都表明 Attrill 等人<sup>[23]</sup> 提出的 EIT 波的连续磁重联模型没有对这些观测事实提

供恰当的解释和说明。此外,这个模型缺少具体的理论及观测支持。

#### 4.4 电流壳模型

为了解传播的 EUV 亮波前的性质, Delannée 等人<sup>[25]</sup> 用两个独立的数值模拟程序 (TK<sup>[89]</sup>, ADG<sup>[90]</sup>) 做了一个孤立的双极磁场区内的扭缠磁通量管的三维 MHD 模拟, 过程如下 (由于两个模拟的图非常相似, 我们这里只引用了 ADG 的图)。

如图 7 所示, 系统磁结构的演化随着扭缠运动的出现而开始, 逐渐形成磁通量管。最扭缠的部分 (在它的中心轴附近) 在图中标记为深蓝色磁力线, 蓝色磁力线表示扭缠通量管的外部, 蓝绿色线几乎没有扭缠, 图中的流线 (红色) 可以显示扭缠磁通量管向上和一侧扩张。由于扭缠是局部的, 因此扭缠线中的磁能密度和磁压力都是增加的。这个压力不能产生通过较低边界的明显的向下运动, 因为边界像是一堵墙, 所以它主要产生扭缠场的向上运动。

在较高的位置, 流线通过扭缠的区域到达不扭缠的区域, 它的方向几乎变成水平的, 所以不扭缠的磁力线不如扭缠的磁通量管中心上升得快。不扭缠和扭缠磁力线的速度差异导致扭缠通量管外部不同扭缠形式的磁力线堆积, 而电流就在扭缠通量管之上和之下的磁力线的堆积层发展。在演化的初始阶段, 弱电流在扭缠通量管的足点形成, 之后电流主要在扭缠通量管的中心形成 (绿色等值面), 逐渐成为一个扩张的 S 形电流层。同时, 一个窄的电流壳形成 (图中黄和红色的面); 它是由回流形成的, 其范围明显随着时间而增加, 最后它的密度和厚度会变得与 S 形电流层非常接近。

图 7 中的流线 (红色) 通过电流壳时其方向从竖直转到水平方向, 显示了垂直方向速度的明显变化, 表明等离子体受到压缩。Delannée 等人<sup>[25]</sup> 认为扭缠通量管的扩张显示了 CME 的特征, 如它在加速之后几乎是以恒定的速度传播。在他们的模拟中, 暗条通常被模拟为弱的扭缠通量管, 而 S 形电流与观测到的软 X 射线 S 形波相关。他们将模拟结果与 1997 年 4 月 7 日和 5 月 12 日的 EUV 波事件进行对比, 发现模拟结果与观测结果符合得很好: 电流壳和 EUV 波都近乎是圆形, 模拟得到的 4 月份和 5 月份事件的速度分别是 363 km/s 和 249 km/s, 而观测得到的速度分别是 369 km/s 和 255 km/s。

因此, 他们提出这个电流壳就是“EUV 波”, 强调电流壳中的焦耳加热可以用来解释 EUV 波的增亮<sup>[37]</sup>, 并指出 EUV 波其实是 CME 的一部分。

#### 4.5 慢模波或孤立子波模型

Wills-Davey 等人<sup>[26]</sup> 指出, 快模波不能解释 EUV 波的以下特征: 快模 MHD 波的速度与观测到的 EUV 波的速度不符。通常认为, 日冕当中的等离子体  $\beta$  值 (压力/磁力)  $\ll 1$ , 而有些情况下观测到的 EIT 波速度, 尽管大于声速, 但是大得不多。这意味着当地的  $\beta$  值不是太小, 这与通常认为的  $\beta \ll 1$  有些不符。快模 MHD 波的速度变化与观测到的 EUV 波不符, 快模 MHD 波的脉冲扰动的性质和持续时间也与 EUV 波不符。

因此, Wills-Davey 等人<sup>[26]</sup> 提出用慢模 MHD 孤立子波解释 EUV 波。因为 MHD 波的速度仅取决于传输介质的性质, 而孤立子波的速度还依赖于脉冲幅度。孤立子波的稳定性取决于脉冲的非线性和局域介质的耗散, 在受到小的微扰时是稳定的, 并能穿过毛衣状的结构在宁静太阳传播较远的距离。孤立子波能对 EUV 波的物理性质——单脉冲、稳定形态、非线性

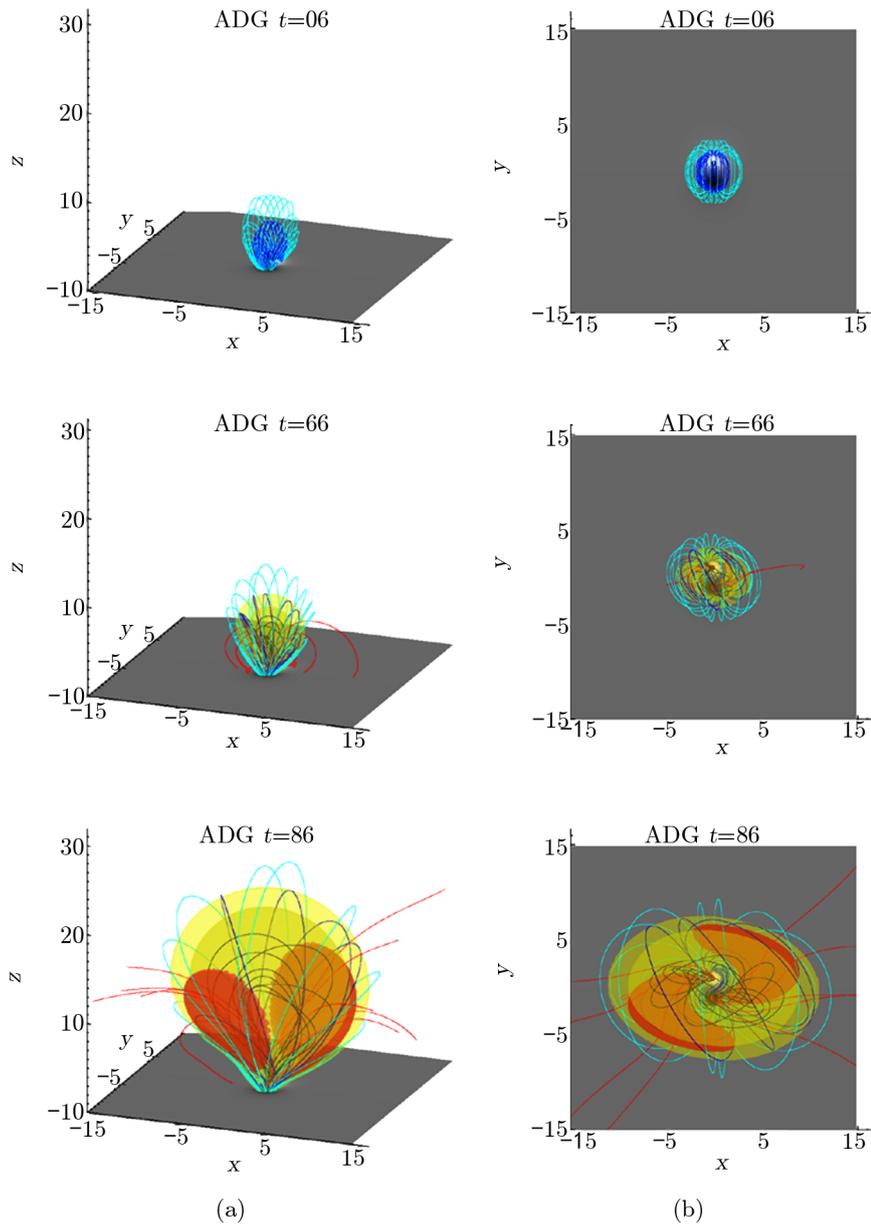


图 7 数值模拟的双极势场和爆发通量管<sup>[25]</sup>

(a) 立体模拟数值效果; (b) 立体模拟投影到平面的效果。蓝绿色、蓝色、深蓝色线磁力线分别表示磁力线  $B_z = 0.3, 0.5, 0.9$ ; 红色线是流线; 黄色、红色、绿色区域分别表示  $J \cdot B / B^2$  为 0.5, 1.9, -1.9 时的透明等值面, 这些面显示了扩张流量管周围电流壳的形成。

性的密度变化、无典型的速度, 给出最好的解释。但是日冕中离子惯性长度比 EUV 波的宽度小 7 个量级<sup>[48]</sup>, 孤生子波很难形成。而且 Liu 等人<sup>[34]</sup> 已经发现了 EUV 波的多脉冲特征。

也有数值模拟将 EUV 波解释为慢模激波。Wang 等人<sup>[91]</sup> 用 ZEUS-2D 程序对二维情况下的磁通量绳失去平衡后的情况进行了数值模拟。他们考虑了两种情况: 一种是系统演化过程中不包含重力; 另一种是包含重力。为了节省计算资源, 实验以初始磁结构处于不平衡状态开始。在不包含重力的情况下, 由于磁通量绳快速运动而激发的快模激波形成后同时向两边和侧后方扩张, 形成一个围绕磁通量绳的新月状特征, 大约在时间  $t=300$  s 到达底边界, 然后从底边界返回, 在它的足点产生一个回波, 并传回日冕 (见图 8)。他们认为这个回波是真实的现象, 而不是人为的结果。

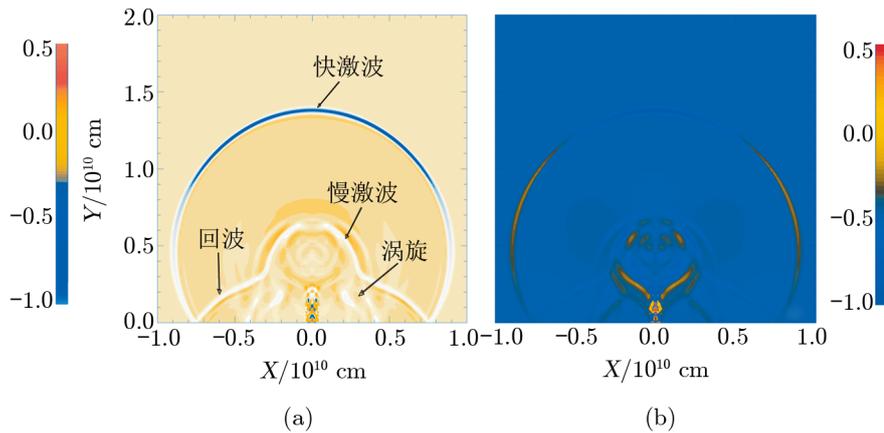


图 8 在有重力的情况下, 爆发时间  $t=500$  s 时激波演化<sup>[91]</sup>

(a) 表示  $\nabla \cdot \mathbf{v}$ ; (b) 表示  $(\nabla \times \mathbf{v})_z$ 。颜色代表数值分布, 左边和右边的颜色条分别代表  $\nabla \cdot \mathbf{v}$  和  $(\nabla \times \mathbf{v})_z$  的值。

通过对速度散度  $\nabla \cdot \mathbf{v}$  的研究, 他们发现快模波在太阳表面  $y=0$  产生扰动的速度为 126 km/s。同时也能看到其他的特征: 从磁通量绳两边发展出来的慢模激波和重联区旁边的速度涡旋 (见图 8 左下角子图中的标注)。速度涡旋向两边传播, 而慢模激波则向边界传播但是不能到达底边界。在传播中它们会与快模激波的回波相遇, 在几种扰动接触的地方,  $\nabla \cdot \mathbf{v}$  显示了复杂的特征。

他们也研究了速度旋度  $\nabla \times \mathbf{v}$  的分布, 得出慢激波在  $y=0.3$  (距日面大约  $3 \times 10^4$  km) 的日冕层产生扰动的速度为 50 km/s。因此他们得出, EUV 波源自慢模激波和速度涡旋的扰动。在包含重力的情况下, 系统从不平衡的状态开始演化, 发生的现象与无重力情况一致, 但快扰动和慢扰动的速度分别为 138 km/s 和 67 km/s。可见重力并没有改变先前得出的结论。

与 Wang 等人<sup>[91]</sup> 的模拟相比, Mei 等人<sup>[92]</sup> 做的数值模拟实验具有更高精度, 在这个实验中使用的是 Ziegler<sup>[93]</sup> 发展的 NIRVANA 程序。实验仍然以初始磁结构处于不平衡状态开始, 针对的现象主要是快模激波的向后扩张、慢模激波、速度涡旋, 以及快模激波在底边界上的回波。与 Wang 等人<sup>[91]</sup> 的实验一样, 慢波向底边界扩张, 速度涡旋横向传播, 回波传回日冕。几种模式的扰动在低冕区相遇, 形成了非常复杂的湍流 (见图 9)。

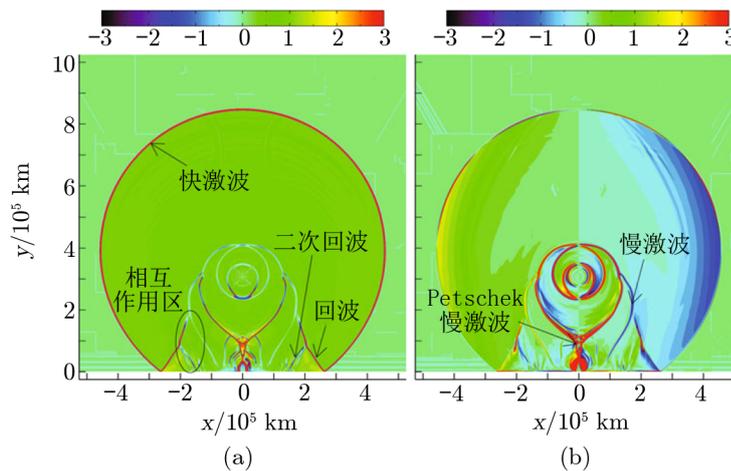


图 9 等离子体速度的散度和旋度<sup>[92]</sup>

(a) 表示  $\nabla \cdot \mathbf{v}$ ; (b) 表示  $(\nabla \times \mathbf{v})_z$ 。图中参数取值为  $t = 240 \text{ s}$ ,  $j_0 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $p_0 = 2.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ,  $\beta = 2.7 \times 10^{-5}$ 。

他们的研究说明, 在强烈或不强烈的爆发中回波都能返回日冕, 而产生的次级回波作为低日冕的扰动, 其速度大约为底边界扰动的  $1/3$ 。每个 EUV 波事件的源都不同, 它依赖于给出的背景环境。由于 Mei 等人<sup>[92]</sup> 的数值实验启用了精度更高的格点分布和计算方法, 所以可得到更加丰富的细节, 并获得更多的信息。这从另一个方面说明, 与 Moreton 波相比, 引起 EUV 波的原因有多种。由每个起因造成的后果之间还会有相互作用, 这就更增加了问题的复杂程度。因此由单一的起因来研究和解释 EUV 波是不够全面的。

另外, 他们还注意到, 在爆发过程中, 磁通量绳迅速向上运动拉伸闭合磁场, 导致周围磁结构体积的快速增大, 而等离子体在磁场中的冻结又阻止了外面的物质进入这个体积。从色球层进入磁结构体积的物质的速度相对磁结构膨胀来说是慢的, 因此相应体积内的等离子体密度会很快下降, 并导致辐射强度下降 (辐射强度大致与密度平方成正比), 所以可以预期暗区的出现。

## 5 两类 EUV 波的共识

Thompson 等人<sup>[3]</sup> 提出 EUV 波是 Moreton 波の日冕对应体, Moreton 波可以很好地用快模波来解释。快模波有两个特殊的性质可以用来帮助我们理解 EUV 波的传播特征: 它能垂直地穿过磁场, 因此能够在太阳表面传播较远的距离; 它是压缩波, 所以能在 EUV 图像上观测到。Warmuth 和 Mann<sup>[48]</sup> 对 78 个 EUV 波的运动特征进行了统计研究, 结果如图 10 所示。他们考察了由 EUVI 观测到的 17 个 EUV 波的初速度与平均加速度之间的关系。结果表明 (图 10), 较快的波有一个明显的减速 (第一组); 中等速度 (约  $170 \sim 320 \text{ km/s}$ ) 的波有一个小量级的加速或减速, 差不多是常速 (第二组); 而非常慢的波 (速度  $< 120 \text{ km/s}$ ) 则显示出

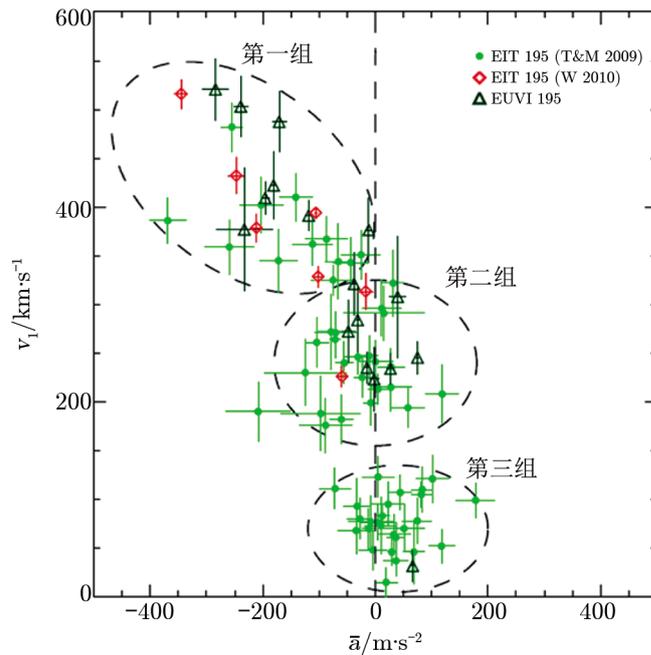


图 10 EUVI 观测的 17 个和 EIT 观测的 61 个 EUV 波的初速度和平均加速度之间的统计关系<sup>[48]</sup>

微小的加速/减速(第三组)。第一组和第二组当中的波可用快模波来解释,但那些慢波(第三组)却与伪波的解释相符合。

Chen 和 Wu<sup>[30]</sup> 研究了 2010 年 7 月 27 日在 SDO/AIA 193 Å 波段观测到的活动区 NOAA 11089 (S24, W21) 西边的微耀斑。他们分析了亮波前演化的两个部分(狭缝 A 和 B, 见图 11), 得出 F1 速度 560 km/s, S1 速度 190 km/s, F3 和 S2 分别是 470 km/s 和 170 km/s; 他们还发现当波前离耀斑的距离为 250'' (1''=725.3 km) 时, S1 停止。他们把 F1、F3 作为快模波, S1、S2 作为 EUV 波。很明显, 磁力线连续拉伸模型能较好地解释这个现象。

Patsourakos 和 Vourlidis<sup>[39]</sup> 总结了 EUV 波的具体特征, 他们用 W 和/或 P-W 分别表明它是否符合波或伪波解释, 然后将他们得到的结果总结如下:

(1) 尽管初始波速有个大的范围, 但所有 EUV 波在宁静区域减速到一个窄的速度范围(约 200~300 km/s), 这对应于标准的快模波速 (W);

(2) 在冕洞周围观测到波反射和透射 (W);

(3) 在活动区观测到波的减速或完全消失 (W);

(4) EUV 波和 CME 的运动特征不同 (W);

(5) 短暂暗区 (W);

(6) 长期暗区 (P-W);

(7) 波前和尾部的增亮 (P-W);

(8) 不同速度的多波前, 有时它们通过彼此相互作用产生二次波动 (W 和 P-W)。

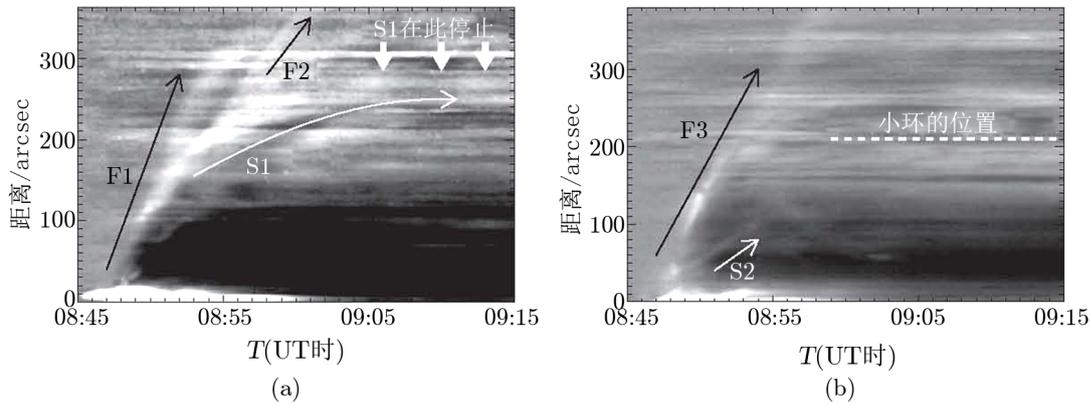


图 11 AIA 193 Å 像差强度分布的时间演化<sup>[30]</sup>

(a) 沿狭缝 A 测量; (b) 沿狭缝 B 测量。沿狭缝测量的距离从耀斑位置开始。

从上面列出的 8 个特征可以看出, EUV 波的波动特征比较多。Patsourakos 和 Vourlidas<sup>[39]</sup> 也支持波的解释。他们认为这是意料之中的, 因为任何运动的扰动在磁化等离子体上将会产生波, 而且快模波是 EUV 波发现之后不久提出的初始解释。那为什么 EUV 波从发现至今有那么多的争论存在? Patsourakos 和 Vourlidas<sup>[39]</sup> 认为是由于“结构混淆”, 把与 CME 相关的 EUV 波与发生的其他现象 (如核心和扩张暗区, 稳定增亮, 偏移和振荡, 多波前和波动流等) 混淆。他们提出, 如果牢记 EUV 波是到达全日面范围的最外层传播的强波前, 再结合太阳表面和日面边缘观测与全球视角和高分辨率的观测, 是可以清楚地辨认 EUV 波的。

其次, 伪波的解释表明 EUV 波不是真正的波, 而是 CME 的扩张外层在太阳表面上的投影<sup>[76]</sup>。在这个层内, 等离子体被扩张 CME 通量绳的侧面压缩, 或在爆发 CME 通量绳表面的电流壳上被加热和压缩<sup>[25]</sup>。伪波的另一种说法是 CME 通量绳横向扩张穿过太阳表面, 在通量绳磁场和宁静太阳磁场的恰当方向上进行一系列的磁重联。这些重联会引起短暂的增亮, 当它们被连续观测到时就出现了一个 EUV 波现象<sup>[23]</sup>。观测到的 EUV 波显示了一系列与伪波相符的特征, 包括稳定增亮、大尺度二次暗区、不稳定性或“慢”(即低于日冕声速) 运动特征分布<sup>[48, 94]</sup>。这两种说法就是电流壳模型和连续重联模型所支持的观点。

最后是混合波的解释, 即试图将前两种相反的观点联系起来。根据混合波的解释, EUV 波有两个成分: 一个是与快 MHD 激波类似的明锐波前, 这也被认为是 Moreton 波的日冕部分; 另一个是与伪波一致的弥散波前。Shen 等人<sup>[33]</sup> 研究了 AIA 观测到的 2012 年 4 月 23 日的 EUV 波事件, 很清楚地表现出 EUV 波的衍射、折射和反射等波特征, 同时, 也显示了在这个波后面传播的慢波前的成分。他们认为波的衍射是由于磁场强度引起的速度梯度导致的: 如果速度梯度大, 就会出现波的衍射和反射; 如果速度梯度小, 就会出现波的折射。他们测量的这个 EUV 事件中活动区 11459 (1355 G) 和 11465 (1924 G) 的磁场强度证明了这一点。支持这个机制的模型则是 Chen 等人<sup>[12, 13]</sup> 的磁力线连续拉伸模型, 在 4.2 节的介绍中详细说明了两个成分的存在。这个观点能更好地解释 EUV 波的特征。

## 6 总结与展望

自从 1998 年 Thompson 等人开始研究 EUV 波之后, 近乎圆形、亮的、在不到 1 h 的时间内通过大部分太阳表面的扰动进入人们的视线。在研究早期, EIT 波被认为是日冕 Moreton 波。但是许多的观测和模拟都表明它们不是同一种波, 它们的速度差异很大, 而且很少一同观测到。对于它们的速度差异, Warmuth 等人<sup>[11]</sup>认为减小的激波振幅引起的减速可以直接解释两者之间的速度差异, 并且认为 EUV 波是快模 MHD 波, 是真正的波。Wills-Davey 等人<sup>[26]</sup>则认为它是慢波孤立子波。其次, 认为 EUV 波不是真正的波, Chen 等人<sup>[12]</sup>认为它是等离子体密度的加强引起的增亮, Attrill 等人<sup>[23]</sup>认为它是重联引起的加热, 而 Delannée 等人<sup>[25]</sup>认为它是电流壳。最后, 有人认为 EUV 波有两个成分: 一个较快, 在前面传播; 一个较慢, 在后面传播。

其实上面三种观点对应的是 EUV 波三种可能的产生机制: 波、伪波或者混合波。但这个问题一直没有定论, 经过十几年的努力之后, 一些研究者倾向于支持波本质的解释<sup>[39, 68, 79, 82]</sup>, 当然其他的一些研究者也支持伪波本质的解释<sup>[23, 25, 76]</sup>或混合波本质的解释<sup>[12, 13, 30-33, 37, 48, 53]</sup>。现在人们已经达成了 EUV 波有两个成分的共识。

同样, EUV 波的源区也是争论的重要话题。耀斑和 CME 是发生在太阳大气中的主要活动, 它们会驱动一些扰动的发生。人们认为 CME 和耀斑是驱动 EUV 波最主要的源区。Cliver 等人<sup>[53]</sup>和 Chen<sup>[17]</sup>的研究都表明 EUV 波不能作为爆震波被太阳耀斑触发, EUV 波与 CME 的关系更密切, 与耀斑相关或不相关的 CME 有约 41% 都与 EUV 波和扩张暗区有关。现在, 大家已经基本确定 EUV 波与 CME 密切相关。

目前对 EUV 波的研究工作已经深入开展, 但是研究者们还须更加努力来明确它的性质, 最好是观测与模拟相结合。现在的观测技术越来越先进, 为 EUV 波的研究提供了前所未有的帮助, 所以不久的将来我们一定可以更深入地了解它的本质。

### 参考文献:

- [1] Delaboudinière J P, Artzner G E, Brunaud J, et al. *Sol. Phys.*, 1995, 162: 291
- [2] Thompson B J, Plunkner S P, Gurman J B, et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 2465: 2468
- [3] Thompson B J, Gurman J B, Neupert W M, et al. *ApJ*, 1999, 517: L151
- [4] Biesecker D A, Myers D C, Thompson B J, Hammer D M, Vourlidas A. *ApJ*, 2002, 569: 1009
- [5] Wuelser J P, Lemen J R, Tarbell T D, et al. *Proc. SPIE.*, 2004, 5171: 111
- [6] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. *Sol. Phys.*, 2011, 275: 17
- [7] Athay R G, Moreton G E. *ApJ*, 1961, 133: 935
- [8] Uchida Y. *Sol. Phys.*, 1968, 4: 30
- [9] Warmuth A, Vršnak B, Aurass H, Hanslmeier A. *ApJ*, 2001, 560: L105
- [10] Warmuth A, Vršnak B, Magdalenić J, Hanslmeier A, Otruba W. *A&A*, 2004, 418: 1101
- [11] Warmuth A, Vršnak B, Magdalenić J, Hanslmeier A, Otruba W. *A&A*, 2004, 418: 1117
- [12] Chen P F, Fang C, Shibata K. *ApJ*, 2005, 622: 1202

- [13] Chen P F, Wu S T, Shibata K, Fang C. *ApJ*, 2002, 572: L99
- [14] Eto S, Isobe H, Narukage N, Asai A, Morimoto T, et al. *PASJ*, 2002, 54: 481
- [15] 林元章. 太阳物理导论, 北京: 科学出版社, 2000: 527
- [16] Priest E R, Forbes T G. *The Astron Astrophys Rev*, 2002, 10: 313
- [17] Chen P F. *ApJ*, 2006, 641: L153
- [18] 林元章. 太阳物理导论, 北京: 科学出版社, 2000: 460
- [19] Gopalswamy N. 20th National Solar Physics Meeting, 2010, 1: 108
- [20] Chen P F. *Living Rev. Sol. Phys.*, 2011, 1: 92
- [21] St.Cyr O C, Howard R A, Sheeley Jr N R, et al. *J. Geophys. Res.*, 2000, 18: 169
- [22] Vršnak B, Cliver E W. *Sol. Phys.*, 2008, 253: 215
- [23] Attrill G, Harra L, van Driel-Gesztelyi L, Démoulin P. *ApJ*, 2007, 656: L101
- [24] Wang Y M. *ApJ*, 2000, 543: L89
- [25] Delannée C, Török T, Aulanier G, Hochedez J F. *Sol. Phys.*, 2008, 247: 123
- [26] Wills-Davey M J, DeForest C E, Stenflo J O. *ApJ*, 2007, 664: 556
- [27] Liu W, Nitta N V, Schrijver C J, Title A M, Tarbell T D. *ApJ. Lett.*, 2010, 723: L53
- [28] Tian H, McIntosh S W, Pontieu B D, Martínez-Sykora J, Sechler M, Wang X. *ApJ*, 2011, 738: 18
- [29] Gosain S, Foullon C. *ApJ*, 2012, 761: 103
- [30] Chen P F, Wu Y. *ApJL*, 2011, 732: L20
- [31] Dai Y, Ding M D, Chen P F, Zhang J. *ApJ*, 2012, 759: 55
- [32] Kumar P, Cho K S, Chen P F, Bong S C, Park S H. *Sol. Phys.*, 2013, 282: 523
- [33] Shen Y D, Liu Y, Su J T, Li H, et al. *ApJL*, 2013, 773: L33
- [34] Liu W, Ofman L, Nitta N V, et al. *ApJ*, 2012, 753: 52
- [35] Thompson B J, Myers D C. *ApJS*, 2009, 183: 225
- [36] Nitta N V, Schrijver C J, Title A M, Liu W. *ApJ*, 2013, 776: 58
- [37] Wills-Davey M J, Attrill G D R. *Space Sci Rev*, 2009, 149: 325
- [38] Handy B N, Acton L W, Kankelborg C C, et al. *Sol. Phys.*, 1999, 187: 229
- [39] Patsourakos S, Vourlidas A. *Sol. Phys.*, 2012, 281: 187
- [40] Patsourakos S, Vourlidas A, Wang Y M, Stenborg G, Thernisien A. *Sol. Phys.*, 2009, 259: 49
- [41] Warmuth A, Mann G. *A&A*, 2005, 435: 1123
- [42] White S M, Thompson B J. *ApJ*, 2005, 620: L63
- [43] Wills-Davey M J, Thompson B J. *Sol. Phys.*, 1999, 190: 467
- [44] Zhitnik I A, Bougaenko O I, Delaboudinière J P, et al. *ESA SP*, 2002, 506: 915
- [45] Lemen J R, Duncan D W, Edwards C G, et al. *SPIE*, 2004, 5171: 65
- [46] Golub L, DeLuca E, Austin G, et al. *Sol. Phys.*, 2007, 243: 63
- [47] Tsuneta S, Acton L, Bruner M, et al. *Sol. Phys.*, 1991, 136: 37
- [48] Warmuth A, Mann G. *A&A*, 2011, 532: A151
- [49] Thalmann J K, Veronig A M, Temmer M, Vršnak B, Hanslmeier A. *CEAB*, 2007, 31: 187
- [50] Asai A, Ishii Takako T, Isobe H, Kitai R, Ichimoto K, et al. *ApJL*, 2012, 745: L18
- [51] Li T, Zhang J, Yang S H, Liu W. *ApJ*, 2012, 746: 13
- [52] Harra L K, Sterling A C, Gömöry P, Veronig A. *ApJL*, 2011, 737: L4
- [53] Cliver E W, Laurenza M, Storini M, Thompson B J. *ApJ*, 2005, 631: 604
- [54] Carmichael H. *NASSP*, 1964, 50: 451
- [55] Sturrock P A. *Nature*, 1966, 211: 695
- [56] Hirayama T. *Sol. Phyc.*, 1974, 34: 323
- [57] Kopp R A, Pneuman G W. *Sol. Phyc.*, 1976, 50: 85
- [58] Kay H R M, Harra L K, Matthews S A, Culhane J L, Green L M. *A&A*, 2003, 400: 779
- [59] Kumar P, Manoharan P K. *A&A*, 2013, 553: A109
- [60] Howard R A, Michels D J, Sheeley Jr N R, Koomen M J. *ApJ*, 1982, 263: L101
- [61] Fisher R R, Munro R H. *ApJ*, 1984, 280: 428

- [62] MacQueen R M, Fisher R R. *Sol. Phys.*, 1983, 89: 89
- [63] Chen P F. *ApJ*, 2009, 698: L112
- [64] Veronig A M, Muhr N, Kienreich I W, Temmer M, Vršnak B. *ApJL*, 2010, 716: L57
- [65] Zhao X H, Wu S T, Wang A H, Vourlidas A, Feng X S, Jiang C W. *ApJ*, 2011, 742: 131
- [66] Yang H Q, Chen P F. *Sol. Phys.*, 2010, 59: 69
- [67] Kienreich I W, Temmer M, Veronig A M. *ApJ*, 2009, 703: L118
- [68] Ma S, Raymond J C, Golub L, et al. *ApJ*, 2011, 738: 160
- [69] Cheng X, Zhang J, Olmedo O, Vourlidas A, Ding M D, Liu Y. *ApJ*, 2012, 745: L5
- [70] Downs C, Roussev I, van der Holst B, Lugaz N, Sokolov I. *ApJ*, 2012, 750: 134
- [71] Patsourakos S, Vourlidas A. *ApJ*, 2009, 700: L182
- [72] Priest E R. *Solar Magnetohydrodynamics*. Holland: Reidel Publishing Company, 1984: 169
- [73] Wu S T, Zheng H, Wang S, et al. *Geophys. Res.*, 2001, 106: 25089
- [74] Chen P F, Fang C. *EDP Sciences*, 2012, 55: 313
- [75] Zhang Y, Kitai R, Narukage N, et al. *PASJ*, 2011, 63: 685
- [76] Delannée C, Aulanier G. *Sol. Phys.*, 1999, 190: 107
- [77] Chen F, Ding M D, Chen P F. *ApJ*, 2010, 720: 1254
- [78] Chen F, Ding M D, Chen P F, Harra L K. *ApJ*, 2011, 740: 116
- [79] Kienreich I W, Veronig A M, Muhr N, et al. *ApJL*, 2011, 727: L43
- [80] Priest E R. *Solar Magnetohydrodynamics*. Holland: Reidel Publishing Company, 1984: 94
- [81] Olmedo O, Vourlidas A, Zhang J, Cheng X. *ApJ*, 2012, 756: 143
- [82] Kwon R Y, Ofman L, Olmedo O, et al. *ApJ*, 2013, 766: 55
- [83] Liu Y, Luhmann J G, Bale S D, Lin R P. *ApJ*, 2011, 734: 84
- [84] Long D M, DeLuca E, Gallagher P T. *ApJL*, 2011, 741: L21
- [85] Schmidt J M, Ofman L. *ApJ*, 2010, 713: 1008
- [86] Yang L H, Zhang J, Shen Y D, Liu W. *ApJ*, 2012, 746: 13
- [87] Yang L H, Zhang J, Liu W, et al. *ApJ*, 2013, 775: 39
- [88] Delannée C. *A&A*, 2009, 495: 571
- [89] Török T, Kliem B. *A&A*, 2003, 406: 1043
- [90] Aulanier G, Démoulin P, Grappin R. *A&A*, 2005, 430: 1067
- [91] Wang H J, Shen C C, Lin J. *ApJ*, 2009, 700: 1716
- [92] Mei Z X, Udo Z, Lin J. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2012, 55: 1316
- [93] Ziegler U D O. *Comp Phys Commun*, 2008, 179: 227
- [94] Zhukov A N, Rodriguez L, de Patoul J. *Sol. Phys.*, 2009, 259: 73

## Progress of the Study on the Coronal EUV Waves

YUE Qun<sup>1,2</sup>, LIN Jun<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, WU Ning<sup>3</sup>

(1. Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 2. Institute of Physics Science and Technology, Yunnan University, Kunming 650031, China; 3. Institute of Geography and Tourism, Yunnan Normal University, Kunming 650031, China)

**Abstract:** Extreme Ultraviolet (EUV) waves are large-scale disturbances in the corona. They can pass through the whole solar disk in an hour at the speed of hundreds of kilometers per second. The EUV wave was first discovered by Thompson (1998) when the data from the

EUV Imaging Telescope (EIT) were studied. So it was originally named EIT wave. It is now generally called EUV wave since its appearance and properties are not dependent on a specific instrument, and ‘EUV’ is more appropriate for describing one of its important physical features. The EUV wave usually has a bright broad relatively-diffuse circular wavefront followed by an expanding dimming region.

The EUV wave is thought to be the counterpart of the chromospheric Moreton wave in the corona. However, very few observation including both phenomena has been reported. Moreover, observations showed that EUV waves have two components, a faster wave in front and a slower wave following. These all indicate that the EUV wave and the Moreton wave are not the same. Though having been studied for years, the physical nature and the driving mechanism of EUV waves still remain unclear. Solar flares and coronal mass ejections(CMEs) are the two candidates to drive EUV waves. Currently, both theoretical and observational studies suggested that the flare cannot cause EUV wave, while CME is more likely to drive the EUV wave. In addition, whether EUV waves are the wave or the pseudo-wave or the hybrid wave is still unknown.

There are five possible mechanisms for explaining EUV waves: fast mode MHD waves, magnetic field lines successively stretching, successive reconnection, current shell, and slow mode wave or solitary wave. The prevailing scenario of explaining the observational characteristics of EUV waves is of the combination of the first two.

Take advantage of the high resolution telescope, we are convinced that EUV waves possess two components, which is supported by many observational evidences. However there are still many unsolved problems, and we hope that we can solve them in the future by development of the numerical simulations and observations of high spatial resolution and high time cadence.

**Key words:** EUV wave; Moreton wave; CME; flare; fast mode MHD wave; solitary wave