日冕极紫外波研究进展

申远灯^{1*}, 李波², 陈鹏飞³, 周新平¹, 刘煜¹

1. 中国科学院云南天文台, 昆明 650216;

2. 山东大学空间科学研究院, 威海 264209;

3. 南京大学天文和空间科学学院, 南京 210023

* 联系人, E-mail: ydshen@ynao.ac.cn

2020-06-22 收稿, 2020-08-18 修回, 2020-08-19 接受, 2020-08-20 网络版发表

国家自然科学基金(11922307, 11773068, 11633008, 11761141002, 41674172)、中国科学院西部之光和云南省基础研究计划(2017FB006)资助

摘要 高温低密日冕磁化等离子体介质可承载多种波动模式的传播. 本文主要介绍低日冕中两类常见的极紫外波动现象: 大尺度极紫外波和准周期快磁声波. 大尺度极紫外波是低日冕中全球性传播的大尺度扰动现象, 它通常与耀斑、日冕物质抛射等剧烈太阳爆发活动紧密相关. 20世纪60年代, 大尺度扰动现象(莫尔顿波)首先在太阳色球层被观测到, 相应的理论模型预言了低日冕中也必然存在与莫尔顿波相关的大尺度扰动现象. 直到20世纪90年代, 空间望远镜才探测到与莫尔顿波类似的日冕大尺度波动现象(大尺度极紫外波). 然而, 关于大尺度极紫外波的物理本质和激发机制长期以来一直存在着巨大分歧. 得益于近年来空间和地面太阳望远镜的高(时间、空间)分辨、多波段、多视角观测数据, 目前人们对大尺度极紫外波的激发和物理本质有了更深入和较为完备的认识. 近年来的高分辨观测还揭示了日冕中的另一类波动现象, 即准周期快磁声波. 本文将总结近年来人们对两类波动的研究进展, 指出目前研究中存在的重点和难点问题, 并展望未来可能的研究方向.

关键词 太阳活动, 太阳磁场, 耀斑, 日冕物质抛射, 磁流体力学波

太阳大气由内到外大致可分为光球层、色球层、过渡区和日冕. 光球层位于太阳内部对流区之上, 厚度约为500 km, 通常被看作太阳表面. 色球层位于光球层之上, 厚度约2000 km. 色球层以上是过渡区, 而过渡区之外的日冕可延伸到整个日球空间. 从光球到日冕, 大气密度和磁场强度随高度增加迅速降低, 而温度则随高度增加迅速升高. 这些物理特性决定了太阳大气中阿尔文速度在光球、色球和低日冕中的典型值分别约为10、100和1000 km/s. 太阳大气特殊的物理环境决定了太阳大气中复杂多变的太阳电磁爆发活动现象, 例如耀斑、暗条、日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)等. 太阳爆发活动不仅造成日冕磁场和等离子体分布的大尺度重构, 同时还向日球空间注入大量的高

能带电粒子和高能电磁辐射, 对人类生产和生活造成灾害性影响^[1].

太阳大气中全球性传播的大尺度扰动是剧烈太阳爆发活动的重要伴生现象之一. 在20世纪60年代, Mor-ton^[2]采用地面望远镜在Ha线翼探测到与耀斑紧密相关的色球大尺度扰动现象, 后被称为莫尔顿波. 莫尔顿波在Ha线心和蓝翼表现为发射亮弧形, 在红翼表现为吸收暗弧形, 莫尔顿波扫过之后在红翼和蓝翼的亮度变化反转, 这表明色球物质先被压缩然后又很快恢复的运动过程. 莫尔顿波的速度大约1000 km/s, 可传播超过 5×10^5 km的距离. 由于色球典型声速和阿尔文速度分别为10和100 km/s, 因此莫尔顿波的速度和远距离传播特性在当时难以得到合理解释: 如果莫尔顿波是

引用格式: 申远灯, 李波, 陈鹏飞, 等. 日冕极紫外波研究进展. 科学通报, 2020, 65: 3909–3923

Shen Y D, Li B, Chen P F, et al. Research progress on coronal extreme ultraviolet waves (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3909–3923, doi: 10.1360/TB-2020-0748

激波,那么它的阿尔文马赫数应该非常大(1000 km/s速度对应的马赫数为10).在没有持续驱动的条件下,这样的强激波将很快衰退,以致于无法传播到很远的距离.另外,莫尔顿波的波前非常弱,多普勒速度仅有10 km/s的量级^[3].这些特征都不支持莫尔顿波是强激波的解释.为了解释莫尔顿波,一些学者提出莫尔顿波可能是日冕中波动导致的色球响应,Uchida^[4]用射线追踪方法证实了这一想法,并指出莫尔顿波是由日冕快磁声波(甚至是激波)的下沿扫过色球并压缩色球等离子体形成.该模型合理地解释了莫尔顿波的观测特征,并预言了日冕大尺度快磁声波或激波的存在.

日冕磁化等离子体介质支持三类磁流体力学波的传播,即阿尔文波和快慢磁声波.阿尔文波是不可压缩的横波,其回复力为磁张力.快慢磁声波均是可压缩的波,其回复力为磁压力和热压梯度力的合力.快磁声波可沿任意方向传播;而慢磁声波对磁场方向具有强依赖性,它几乎不能跨越磁场传播.高温日冕等离子体在极紫外和X射线波段辐射最强.然而由于地球大气的影响,对日冕极紫外和X射线波段的观测只能在外太空进行.20世纪90年代,Yohkoh卫星(1991年发射)上的软X射线望远镜^[5](soft X-ray telescope, SXT)与太阳和日球天文台(Solar and Heliospheric Observatory, SOHO; 1995年发射)上的极紫外成像望远镜^[6](extreme-ultraviolet imaging telescope, EIT)开始对日冕进行全天候全日面成像观测.全球性大尺度日冕扰动现象最早在EIT望远镜的195 Å(Fe XII发射线,峰值形成温度1.5 MK)波段被观测到^[7],并被命名为EIT波.EIT波与莫尔顿波具有高度相似性,比如它们都与耀斑相关,都有弧形或环状发射结构,都可横跨大部分日面远距离传播(图1(a)),而且有时还表现出重合的关系.所以,EIT波很快就被认作是莫尔顿波の日冕对应体,也被解释为耀斑压力脉冲激发的快磁声波或激波^[8,9].然而,后来的观测很快对该解释提出了质疑^[10~12],从而开启了EIT波是不是波、其驱动源是耀斑脉冲还是CME等问题的长期争论^[13,14].

EIT波的观测大致可分为3个阶段,分别以SOHO(1995~2006年)、日地关系天文台^[15](2006~2010年, Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO)和太阳动力学天文台^[16](2010年至今, Solar Dynamics Observatory, SDO)三代空间卫星为代表.在这期间,观测数据的时间分辨率从12 min提升到12 s,空间分辨率从5.2"提升到1.5",观测波段从4波段提升到9波段.值得一提的是,STEREO采用两颗卫星从不同角度对太阳进行同

时观测,这一时期的研究更多地揭示了EIT波的立体构造和相关物理属性^[17].观测数据质量的不断提高使得人们对EIT波的激发、演化以及物理性质有了全新的认识.需要说明的是,在20多年的研究中人们给EIT波取了多个名称,例如极紫外波、全球性日冕波、日冕传播波前、大尺度日冕传播波前等^[3].由于EIT波主要是指在极紫外波段被观测到的大尺度扰动现象,下面将使用大尺度极紫外(extreme-ultraviolet, EUV)波这一名称.

日冕准周期快磁声(quasi-periodic fast-propagating, QFP)波是SDO上的大气成像组件^[18](atmospheric imaging assembly, AIA)观测到的一种新的日冕波动^[19].它通常在AIA 171 Å(Fe IX发射线,峰值形成温度为0.8 MK)波段最显著,并与耀斑密切相关.不同于EUV波,QFP波沿磁力线传播,有多波前、较小的波幅和传播范围^[20~24](图1(b)).目前,关于QFP波的激发机制、传播规律以及它与其他太阳爆发活动的关系等都还不太清楚^[13].

作为剧烈太阳爆发活动的重要伴生现象,研究日冕极紫外波对诊断耀斑、CME等物理过程具有重要意义.除了自身研究价值外,极紫外波在能量传输和转移、诱发其他太阳活动、太阳高能粒子加速、日冕加热和太阳风加速等方面也非常重要.另外,还可利用极紫外波的传播特性,采用冕震学的方法估计一些难以直接测量的日冕参量(如日冕磁场).本文主要总结目前人们对日冕中常见的EUV波和QFP波的主要研究成果,试图指出两类极紫外波研究中的重点和难点问题,并展望未来可能的研究方向.感兴趣的读者可参阅以往的一些综述论文^[13,14].

1 EUV波

1.1 EUV波的多波段观测

EUV波自1998年被报道以来便受到太阳物理界的高度重视.除太阳极小年外,每年大约有100次EUV波事件发生^[14].除极紫外波段外,软X射线、紫外波段、Ha、He I、白光以及射电等波段也有类似的大尺度扰动现象.

早期低时间、空间分辨率观测显示,EUV波通常以为耀斑为中心的单峰弧形或环形弥散结构^[26].它首先出现在距离耀斑中心约100 Mm(0.14个太阳半径)的位置,并以几百千米每秒的速度向外传播.EUV波的平

图1 (网络版彩色) 差分图像展示发生于1997年5月12日的EUV波事件^[7]((a), EIT 195 Å)和2011年5月30日的QFP波事件((b), AIA 193 Å)^[21,25]
Figure 1 (Color online) Running difference images that show the EUV wave on 1997 May 12^[7]((a), EIT 195 Å) and QFP wave on May 30, 2011^[21,25]((b), AIA 193 Å)

均传播距离约为500 Mm(0.72个太阳半径), 少数EUV波可跨越整个可见日面^[7], 甚至整个太阳球面^[27]. EUV波波前宽约100 Mm, 极紫外辐射强度扰动幅度约为背景强度的25%. 统计研究表明, 大约有7%的EUV波具有较为锐利的波前(即S波)^[28,29]. 这类波动通常与莫尔顿波相关, 它的初始宽度和辐射扰动幅度约为20 Mm和100%以上, 但在传播过程中会逐渐演化为弥散的波前^[30]. 另外, 还有部分事例在开始时可以看作是EUV波, 但是它们的传播距离较短, 而且具有非常不规则的波前^[29].

近年来, 越来越多的高分辨观测显示EUV波具有快慢两个成分, 其中快速分量的速度约为慢速分量的3倍^[31~37]. 快速分量具有明显的磁流体波动性质, 通常被解释为快磁声波或激波; 慢速分量波动性质不明, 它通常被解释为CME爆发时磁力线重组所造成的表观波动^[34,38,39]. 部分高分辨观测表明, EUV波的快速分量具有准周期多波前结构, 它们可能是通过爆发源区内多次激发或单一波前在传播过程中通过色散机制形成^[40~45]. 慢速分量也有多波前结构, 它们可能是由连续扩张的磁环压缩等离子体形成^[46].

边缘或多视角观测揭示了EUV波的三维结构和相关物理性质. EUV波具有穹顶状形态, CME被包围在其

内部. 研究发现, 圆顶状EUV波径向部分的速度是侧向部分的1.3~2.3倍^[45,47,48]; 射电观测也揭示了类似的关系^[48]. EUV波不同部分传播速度的差异可能是由CME对它们的驱动时间长短不同所造成. 径向部分被CME持续驱动, 而侧向部分则仅在开始阶段被CME侧向膨胀短暂驱动^[47]. 另外, 低日冕中快磁声波特征速度随高度增加而增大的特性可能也有一定贡献^[49]. 多视角观测揭示了EUV波形成的详细过程, 它最初与CME一起运动, 当CME上升到距离日面约90 Mm的高度并进入快速侧向膨胀阶段时, EUV波便从CME结构中分离出来, 并在日冕中自由传播^[48,50~52]. 三维几何拟合和磁流体数值模拟也揭示了EUV波在前、CME在后的空间关系^[51,53]. 三角测量结果显示, EUV波的传播高度为离日面约100 Mm, 这一高度对应于温度1~2 MK日冕标高的1~2倍^[50,54,55]. 另外, EUV波随高度增加具有相对于日面向前倾斜的结构, 并且在传播过程中倾斜程度逐渐加剧^[20,40,50,51]. 由于低日冕中快磁声波速度随高度增加, 该特征可能是由EUV波被介质不断折射导致^[49].

除极紫外波段外, 类似的大尺度扰动也在其他谱线上被探测到. 由于不同谱线的形成温度不同, 它们反映了太阳大气不同高度上的物理信息, 因此对EUV波的多波段观测反映了它在高度上的立体特征. 软X射线

观测温度 >2 MK的日冕热等离子体. 采用软X射线观测到的大尺度扰动具有比EUV波动更锐利的波前, 这可能是因为软X射线只观测到EUV波初始阶段^[40,56~58]. Kwon等人^[59]发现, 日冕仪白光数据在高日冕中探测到的激波信号是低日冕中EUV波动的对应体. 在色球层, 除前面讲到的莫尔顿波外^[34,60], 在近红外He I谱线上也探测到大尺度扰动信号^[41,61]. 因为日冕辐射的增强会让He I谱线更弱, 观测到的扰动为黑的吸收特征, 具有比莫尔顿波更宽的波前. He I谱线的形成较为复杂, 它同时包含日冕、过渡区以及色球的信息, 所以He I波中显示的弱和强波动成分可能分别来自日冕和色球的变化^[61]. 另外, 与EUV波相关的大尺度扰动信号也可在射电米波和微波观测图像上探测到^[62~65]. Shen和Liu^[34]采用SDO/AIA数据第一次观测到EUV波在光球顶层的温度极小区和过渡区的响应信号, 完整地呈现了EUV波在光球、色球、过渡区以及低日冕中的重合关系. 绝大部分观测表明, 不同大气高度上的大尺度波动信号对同一事件而言基本上都是重合的, 反映了同一EUV波在不同温度和大气高度上的响应情况^[14]. 需要注意的是, EUV波是发生在日冕中的物理过程, 并不是所有的EUV波都能在温度极小区、色球以及软X射线等波段产生响应信号. EUV波是否在太阳大气其他层次产生响应信号可能受到波动强度、磁场倾斜角度等条件的影响^[66~68].

米波射电II型暴从高频向低频漂移被解释为激波在日冕中从低到高运动的信号. 小样本统计研究表明, 与莫尔顿波相关的EUV波与射电II型暴具有强相关性^[30], 并且采用射电II型暴推算的波速与成像观测测量得到的波速一致^[34,45]. 但是, 如果考虑所有EUV波, 它与射电II型暴之间的相关性却不高^[28,69~71]. 这可能是由于统计样本中包含了大量慢速的表观波动事例^[3]; 另外, 可能还有许多是线性或简单波, 它们并未形成激波进而造成射电II型暴, 或是激波强度不足以产生射电辐射.

1.2 EUV波的物理参量

EIT望远镜低时间、空间分辨率数据的统计研究表明, EUV波的速度为 $50\sim 700$ km/s, 平均速度为 191 km/s^[29]. 基于AIA高分辨数据统计, EUV波的速度为 $200\sim 1500$ km/s, 平均速度为 607 km/s^[70]. 这些结果都表明EUV波的平均速度远低于莫尔顿波典型速度(1000 km/s). 虽然有些观测表明莫尔顿波和EUV波在时间、空间上是相互对应的, 但它们的速率差异使得

一些学者怀疑EUV波是否是莫尔顿波的日冕对应物. 对于快磁声波模型的支持者来说, 因为莫尔顿波仅对应于EUV波速度较快的初始阶段, 二者速率差异可通过考虑EUV波的减速来解释^[72]. 观测表明, 所有与莫尔顿波相关的EUV波在不同波段上的运动过程是一致的, 初始速度大约都是 1000 km/s, 然后快速减速到约 300 km/s^[34,63]. 由于莫尔顿波对应EUV波的初始阶段, 自然显示出较高的平均速度; 而EUV波的持续时间较长, 其平均速度显然会更低. 为了解决此争端, 可靠的方法应该也是比较莫尔顿波和EUV波在同一时间段的平均速度. 高时间、空间分辨率统计表明, 初始速度越高的EUV波具有越强的减速度^[73]. EUV波的减速度范围约为 $0\sim 2$ km/s², 典型值为 0.2 km/s², 而且随时间和距离增加而降低^[34,63,74]. 比较合理的解释是, EUV波可根据运动情况分为三类, 即高速且减速快的非线性快磁声波或激波、中等速度且减速度小的线性快磁声波以及速度非常慢且具有恒速或略微加速的表观波动^[13,70,75].

EUV波的强度轮廓为高斯函数形态, 其幅度(宽度)随时间增加而减小(增加), 但轮廓曲线包围的面积却保持常数. 这些性质与非线性波或激波演化为自由传播的线性磁声波的物理过程相似^[47,76]. EUV波的扰动轮廓宽度通常从约 $20\sim 50$ Mm增长到 $70\sim 200$ Mm, 而幅度约从 $20\%\sim 60\%$ 下降到 $5\%\sim 20\%$ ^[44,47,71,77~79]. AIA高分辨观测表明, 扰动轮廓的幅度具有先增大后减小的特征, 体现了EUV波先陡化再变宽的过程^[34,46]. Long等人^[77]发现EUV波的扰动幅度在不同极紫外波段上有所不同, 并估算出轮廓宽度的增长率和色散率分别为 200 km/s和 10 Mm²/s. 另外, EUV波的马赫数可采用多种方法进行估计, 例如波速、密度压缩比、射电II型暴频带分裂等. 研究表明, 快速和中等速度EUV波初始阶段的马赫数分别为 >1.15 ^[34,44,45]和 <1.04 ^[78]. 这些结果表明, EUV波是非线性快磁声波或激波. 软X射线波和莫尔顿波的马赫数较大, 分别为 $1.3\sim 1.4$ 和 >2 ^[40,57,74], 表明它们对应于强度较强的EUV波.

EUV波通常在AIA 193 Å(峰值温度 1.6 MK)和 211 Å(峰值温度 2.0 MK)波段强度增强最显著, 在 335 、 94 、 131 和 304 Å波段逐渐减弱, 在温度较低的 171 Å波段时常表现为暗的强度降低. 这表明EUV波导致的等离子体加热发生在 $0.8\sim 1.6$ MK^[13]. 统计结果表明, 大约 41% (17%)的事例在 171 Å表现为暗的强度减弱(增强)^[70], 而且速度较快(>900 km/s)的EUV波在 171 Å大多表现为亮波前. 在 171 Å观测到的EUV波暗波前会随

后变亮. 其中的变暗可能是由等离子体压缩造成的绝热加热导致, 与莫尔顿波以及光谱观测到的红蓝移现象一致^[20,80,81]. 在绝热加热假设下, 2011年2月15日 EUV波造成的密度压缩约为10%, 温度增加约为7%^[82]. 采用其他方法估计得到该波动造成的密度压缩在1.12~1.56, 等离子体被加热到2.8 MK^[48,83,84].

因为EUV波的单波前结构, 早期研究中很少有人考虑它的周期性问题. Ballai等人^[85]通过分析波前的强度振荡, 得到EUV波前中存在周期大约为几分钟的振荡. 另外, 少数几个事例中观测到多波前的出现, 但是却没有周期性分析^[40,43]. 最近, Shen等人^[45]采用AIA高分辨数据清楚地观测到EUV波的准周期多波前结构; 他们不仅测得该EUV波的周期约为163 s, 并且第一次获得EUV波的波长大约在84~110 Mm.

1.3 EUV波的形成

EUV波的形成与耀斑和CME紧密相关^[12]. 理论上, 激波可以通过CME激发, 也可以通过耀斑压力脉冲激发, 前者更接近活塞式激波机制, 驱动活塞的速度可以低于激波速度. 它和耀斑激发的激波不同, 耀斑压力脉冲产生的激波在介质中做自由传播; 而CME激发属于活塞式激波和弓激波二者的结合, CME在日冕中快速运动(投射效应)的同时还向四周膨胀(三维活塞效应), 激波最初的形成主要由CME的三维膨胀主导. 太阳爆发活动中, 除未遂(失败)爆发外, 大多数成功爆发事件都同时伴随耀斑和CME. 绝大部分事件中CME的加速相和耀斑爆发相基本同时发生, 而这一时间同时也对应EUV波的形成时间. 这就导致人们难以区分EUV波是耀斑压力脉冲还是CME所激发^[12].

在1973年CME被发现之前, 莫尔顿波被解释为耀斑压力脉冲激发的爆炸震波^[4]. 尽管一些研究表明莫尔顿波有时也和弱耀斑相关^[86], 而且EUV波似乎与CME相关性更高^[11], 但是耀斑激发EUV波的思想在后来的很多研究中仍然被继续采用^[41,58,61,87]. EUV波的开始时间接近于耀斑硬X射线流量爆发相开始或峰值时间, 从EUV波波前传播倒推的爆发中心也靠近耀斑中心位置. 这些结果似乎表明耀斑和极紫外波在时间、空间上具有强相关性^[12,41,58,87]. 部分观测结果也倾向于支持耀斑激发EUV波的观点, 比如, (1) EUV波的形成时间晚于CME加速相10多分钟, 但却与耀斑爆发相密切相关; (2) 在非CME相关事例中, EUV波开始时间与耀斑爆发相强相关; (3) 在连续EUV波和连续射电

II型暴事例中, 仅有部分EUV波可能是由CME驱动; (4) 射电II型暴辐射源出现在CME前沿后方, 且前者运动速度比后者快等^[12,14].

后来更多的统计结果显示, 相当一部分EUV波与弱耀斑(弱压力脉冲)相关, 有的事件甚至没有相关的耀斑; 另外, EUV波与射电II型暴相关性较低^[28,29,70,71]. 针对强耀斑(强压力脉冲)的统计研究表明, 即使耀斑能量很高, 在没有CME出现的情况下也不会产生EUV波^[88]. 这些结果使得人们越来越相信EUV波是由CME激发, 该思想近年来得到越来越多高分辨观测结果的支持^[13,17]. 研究表明, CME泡状结构的侧向和向下快速膨胀过程对EUV波的形成具有重要作用^[17,20]. 在许多事例中, 通常先观测到一组磁环从活动区中心开始缓慢上升并形成一泡状结构; 该结构随后会加速膨胀并最终形成CME. EUV波通常形成于CME初始阶段的加速膨胀阶段. CME泡状结构侧向膨胀加速度是影响EUV波形成的关键因素, 加速度越大, 则产生越强的非线性快磁声波或激波^[12,17]. 如果侧向和径向膨胀加速度都足够快, 通常会形成圆顶状的EUV波^[47]; 如果仅侧向膨胀加速度足够快, 则在泡状结构侧向前方形成沿日面传播的EUV波. 目前, 一些观测和理论研究倾向支持早期的EUV波是由CME的侧向膨胀激发的^[43,48,52,84,89,90].

EUV波还有其他的一些激发方式, 包括小尺度喷射现象、冕环膨胀以及爆发暗条中的丝状螺旋结构周期性解缠等. 高分辨观测发现, EUV波可直接形成于爆发等离子体团前方^[91]; EUV波还与一些小尺度日浪、极紫外喷流、微暗条爆和微S形结构等密切相关^[92~95]. 在一次复发性喷流活动中, Shen等人^[96]首次报道了沿跨赤道磁环运动的EUV波形成于喷流前方的观测证据, 每一次喷流分别激发一个EUV波. 他们发现, 喷流(驱动源)速度远低于它激发的激波速度, 这与一维活塞式激波的形成机制一致. 他们还报道了喷流作用于大尺度磁环并导致后者发生突然侧向膨胀运动, 进而激发EUV波的事例^[95]. 另外, 喷流活动中, 磁重联中新形成的磁力线在磁张力作用下向外快速膨胀也可以激发EUV波和射电II型暴^[97]. 值得注意的是, 在这些与喷流相关的EUV波事例中都没有相关的CME, 而且波动的寿命通常都小于10 min, 远低于CME激发的EUV波寿命. 这是因为非CME相关的EUV波缺少像CME激发的EUV波那样的持续驱动源. 最近, Shen等人^[45]发现准周期EUV波的周期与爆发暗条丝状结构相继解缠的周期一致, 并提出爆发暗条中丝状螺旋结构连续解缠导致

的膨胀运动能够激发准周期EUV波的思想. 在该事件中, 相关联的射电II型暴和莫尔顿波表明, 周期性波动结构中的第一个波前可能是由CME驱动. 但是, 由于波动周期与耀斑脉动周期无关, 因此并不支持其他波前是耀斑连续能量释放激发周期性EUV波的思想^[41,87].

1.4 EUV波与日冕结构的相互作用

EUV波在非均匀日冕中传播时将和各种磁场结构发生相互作用, 从而改变它的自由传播状态. 由于活动区和冕洞等强磁区域边界处快磁声波特征速度梯度较大, 时常会导致EUV波在这些位置发生反射和折射等现象. EUV波对日冕磁结构的扰动还可导致冕环和暗条的振荡, 有时甚至诱发其他太阳爆发活动. 早期少量低分辨观测发现EUV波会避开强磁场区域传播^[7], 或在冕洞边界发生反射等^[98]. 近年来AIA高分辨观测提供了更多相互作用的案例, 对澄清EUV波的物理本质具有重要意义^[99].

EUV波的反射一般发生在冕洞、活动区和磁亮点边缘^[34,35,45,79,90,100-103]. 反射波的速度一般比入射波慢, 大约是入射波的30%~60%. 反射波速度变慢可能有几个原因, 包括: (1) 入射波可能是激波, 而反射后变为线性磁声波; (2) 反射波传播区域为入射波经过的地方, 而这一区域的磁场和等离子体环境可能因为入射波的经过而改变, 从而导致快磁声波特征速度变小, 抑或存在激波下游的流动, 使得逆流方向的波动速度变慢; (3) 反射波与入射波可能不在同一个平面, 投影效应会导致反射波的速度变小^[104].

EUV波有时会穿过活动区^[35]、冕洞^[100]和磁绳空腔^[20]等结构继续传播. 因为这些磁结构的特征速度大于宁静区, 波在穿越过程中传播速度比入射波快大约10%~60%. 有时, EUV波穿越活动区时其强度会变弱甚至消失^[34,79], 这大致可理解为波动的能流守恒(正比于幅度平方和群速度的乘积). 当EUV波进入强磁场区域时, 速度变快的同时幅度将减小.

EUV波在强磁场结构边缘发生折射的现象在许多数值模拟中都有预言^[4,8,9], 它是由波动倾向于向低快磁声波速度区域传播造成的, 在观测上表现为波的传播方向的改变^[35,44]. 例如, 在EUV波穿越活动区时, 它的传播方向将在进入和离开活动区边界时发生两次改变^[27,35]. 由于快磁声波速度在低日冕中随高度增加而变大, EUV波的折射还体现在波前相对于日面的倾角会变得越来越小^[20,40,50,54]. EUV波的反射、折射和穿越

等现象充分展现了它波动性质的一面.

EUV波与冕洞或活动区作用时, 在这些磁结构边界处形成局地增亮, 被称作静止波前, 它可持续存在几个小时^[10]. 由于这些位置代表磁分界线的位置(两侧磁场属于不同的磁场系统), 如果在边界附近没有次级波出现, 则代表着EUV波不能穿越磁分界线而停止. 近年的高分辨观测清晰显示了EUV波在这些位置发生的反射、折射、穿越等现象, 因此静止波前并不代表EUV波传播的停止. 静止波前可以由磁流体力学波触发的局地能量释放^[9]造成, 也可由非波模型中描述的磁场重构造造成的等离子体压缩、连续磁重联造成的能量释放或电流焦耳耗散加热所造成^[11,38,39,105,106]. EUV波的快慢分量均可导致静止波前的形成, 其中慢成分导致的静止波前更适合非波模型的解释^[107], 而快波成分导致的静止波前可能是由部分快磁声波转化为慢磁声波并被束缚在磁力线中所导致^[108,109]. 另外, EUV波与磁环作用时还可转化为QFP波^[95]. 有时, 可在EUV波后方观测到区别于爆发源区的次级日冕暗化现象^[10], 其形成原因可能是流绳爆发导致的等离子体流失, 也可能是EUV波经过后介质的回复导致的等离子体变稀疏^[76]. 如果是前者, 那么次级日冕暗化现象便更支持EUV波是表观波动的解释.

EUV波在传播过程中还会触发暗条、冕环、盔状流等发生振荡运动. 这些磁结构被EUV波扫过后将先发生一个较大的偏移, 然后开始做阻尼振荡运动. 早期研究表明, 莫尔顿波可导致距离爆发源区较远的暗条产生横向振荡^[110,111]. 后来又发现, 在没有莫尔顿波的情况下, EUV波也会导致暗条发生横向振荡^[44,45,90,112,113]. 当日面上有多个暗条时, 因EUV波到达不同暗条需要的时间不同, 暗条将按离爆发源区距离远近依次发生振荡运动^[20,112]. 当EUV波作用于暗条的角度不同时将触发不同模式的暗条振荡: EUV波垂直(平行)作用于暗条轴向时将激发横向(纵向)暗条振荡^[114]; 二者呈锐角相互作用时将导致暗条同时发生纵向和横向振荡^[115]. EUV波通常还会引起冕环和盔状流发生横向振荡^[44,45,51,59].

在21世纪初人们便认识到大尺度波动可以触发太阳活动的连续发生. 虽然一些数值模拟已经显示了该可能性^[9], 但是实际观测事例并不多. 在2011年9月6日事件中, Shen等人^[112]发现EUV波在日面上传播时依次触发了多个位于不同位置的暗条发生振荡运动, 同时还触发一次发生于冕洞边缘的喷流活动. 该研究说明, 携带能量且远距离传播的EUV波是连接不同位置短时

间内发生的连续太阳活动之间的物理纽带。

1.5 EUV波的解释模型

人们提出了各式各样的EUV波解释模型,包括波动模型、非波模型、混合模型。波动模型将EUV波解释为快磁声波、慢磁声波、孤子波等;非波模型将EUV波解释为磁场重构、磁重联、电流壳内焦耳加热等;而混合模型则同时包含对EUV波和非波成分的解释。

1.5.1 波动模型

EUV波表现多种波动特性,例如,(1)反射、折射和穿越等现象;(2)波前强度轮廓随时间的演化特征;(3)触发暗条和冕环振荡;(4)波模转换;(5)较高的初速度和明显的减速特征;(6)与莫尔顿波、X射线波和He I波等其他波段大尺度扰动的强相关性。所以,很多学者将EUV波解释为磁流体力学波。

Uchida^[4]提出的日冕中快磁声波(激波)的底部扫过色球面形成莫尔顿波的思想成为后来很多模拟工作的

基础。大多数数值模拟工作认为EUV波是快磁声波,并合理地解释了EUV波的大部分观测特征,甚至可以合成图像与观测图像进行直接对比^[8,116-118]。因为部分观测显示EUV波的速度可低至慢模声甚至声速^[119,120],所以也有学者将EUV波解释为慢磁声波^[121]或者孤子波^[119]。

1.5.2 非波模型

一些观测特征诸如静止波前、次级日冕暗化、缺少相关的莫尔顿波和射电II型暴等似乎表明有些EUV波可能不是物理上的波动。所以,一些学者认为一些EUV波可能是由CME爆发过程中日冕磁场重构引起的表观波动现象。这些模型包括磁力线连续拉伸模型^[38,39]、电流壳模型^[11,122]、连续磁重联模型^[106]、CME投影模型^[123,124]等。磁力线连续拉伸模型认为,磁绳爆发时会推动上方磁力线向上运动,被拉伸的磁力线从内到外依次将扰动传输到磁力线足点附近并造成向外传播的表观波动(图2(b))。电流壳模型认为,三维磁绳爆发时将在其上方形成一个电流壳层,视向投影可

图2 (网络版彩色)EUV波混合模型^[38]。(a) 密度、磁场(实线)和速度(箭头)的整体演化过程;(b) 显示局部密度、磁场(虚线)和水平速度(箭头)演化,其中实线表示初始磁场位形

Figure 2 (Color online) Hybrid model for EUV waves^[38]。(a) The global evolution of the density, magnetic field (solid lines), and velocity (arrows); (b) the local evolution of the density, horizontal velocity (arrows), and magnetic field (dashed lines), in which the solid lines represent the initial magnetic configuration

得到与EUV波形态相似的圆形或椭圆形,而增亮是由电流壳层内的焦耳加热所导致.连续磁重联模型认为,爆发的CME在侧向上与附近的低矮磁力线连续发生磁重联,这一过程将会产生类似EUV波形态的增亮结构.这些模型可以很好地解释EUV波的形状、增亮特征甚至传播速度等,但是却很难解释EUV波的大尺度全球性传播特性以及相关的波动特征.

1.5.3 混合模型

混合模型同时包含了波和非波两个成分,该模型近年来得到越来越多观测事例的证实^[3].Chen等人^[38,39]最早提出混合模型(图2).他们发现,磁绳爆发过程中会在其前方驱动一个快速活塞式激波,速度大约750 km/s.该激波被称作日冕莫尔顿波,与色球莫尔顿波相对应.另外,在快激波后方还有一个慢速传播的扰动,其速度约为快激波的1/3.他们认为,该慢速传播的扰动是由磁绳上方的磁力线在被连续拉伸过程中将扰动传播到足点并压缩等离子体而形成,属于表观波动现象.

需要指出的是,以往基于低分辨数据的许多观测研究将所有观测到的波动都称作EUV波,这是有歧义的.这些研究中速度较快的应该是日冕非线性快磁声波或激波;而那些速度较低的扰动则对应于表观波动.高分辨观测揭示的各种波动特性应该都是针对快速传播的快磁声波(激波)成分,而关于慢速扰动的波动性质至今还没有更多的证据说明它是波动性的.因此,目前对慢速成分的解释仍然存在分歧.后来的一些数值模拟也发现类似的双波成分,快波成分都被解释为快磁声波或激波,而对慢速扰动成分却有不同的解释,比如慢磁声波解释^[116]、爆发CME造成的等离子体压缩^[118]、与电流壳相关的压缩波前^[82]、慢磁声波和速度漩涡的复杂合成^[121]、快波成分在其底部造成的物质堆积^[125],以及流绳后方的物质流与流绳碰撞激发的波^[126]等.

最近的三维模拟结果显示,快波成分与大多数观测结果一致,它可传播到很远的距离,并展现出典型波动特征,以及它与CME侧翼的分离过程等.但是慢速传播的扰动并未展现出任何波动特性,这部分的主要贡献可能来自膨胀CME造成的等离子体压缩,或者直接代表了CME泡状结构在日面上的投影^[53,127].

2 QFP波

2.1 QFP波观测特征

QFP波是AIA望远镜探测到的一种有别于EUV波

的波动模式^[19~22],它与耀斑、射电斑马纹、纤维状结构以及成功太阳爆发活动紧密相关^[128].QFP波的能量可局地加热活动区磁环^[19,22].QFP波表现为沿磁力线传播的多波前弧形结构、角宽度约 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、密度扰动幅度约1%~5%、周期约25~400 s,持续时间约几分钟到1 h^[13,129~131].QFP波通常在AIA 171 Å波段最显著,偶尔可在193和211 Å波段出现^[20,22].

QFP波最早出现位置离耀斑中心的距离通常>100 Mm,这可能是因为扰动幅度需要一定的增长时间并传播一定的距离才能被仪器探测到^[132].另一方面,引导QFP波的漏斗状磁结构的发散特性使得越靠近磁力线足点处磁场强度越强,所以扰动难以在靠近磁力线足点附近形成明显的等离子体压缩而被望远镜探测到.QFP波的传播速度可超过2000 km/s^[11],且具有较强的减速度($1\sim 4\text{ km/s}^2$),波幅随传播距离增加先增加后减小^[25].QFP波时常在传播过程中表现出明显的波动效应.比如,与强磁场结构作用发生明显的折射效应进而改变传播方向^[23,94];沿闭合磁力线传播时,波前在磁力线另一端被反射并导致闭合磁环的振荡等^[19,45,133].

2.2 QFP波的解释和模型

Liu等人^[19]将QFP波解释为沿漏斗状磁结构传播的快磁声波.然而,QFP波并不像EUV波那样可沿任意方向传播,这表明它可能被束缚在特定的波导结构中.波导结构可分为两类.在第一类波导结构中,其内部快磁声波速度比周围背景小(可由密度增加导致),从而它可通过内部反射将波束缚在其内部传播.第二类波导结构正好相反,其内部快磁声波速度大于周围背景,属于泄漏型波导.在其内部传播的波将发生色散,不同频率的波按不同速度传播进而导致与激发源不同的波动周期^[134].在不考虑激发机制的情况下,Ofman等人^[133,135]的三维磁流体力学数值模拟较好地再现了QFP波的形态、幅度、波长、传播速度等物理参量,以及在闭合磁力线远端的反射现象.他们发现,由于漏斗状磁结构的发散特征和低日冕中磁场强度随高度增加快速减小等原因,QFP波的速度和能流密度将随高度增加迅速降低.另外,QFP波波幅在传播过程中先增强后减弱的特性可能由两个原因共同导致,即大气密度重力分层造成的波幅放大效应和波导结构扩张特性决定的波前变弱效应^[134,136].当QFP波和EUV波出现在同一事件中时,前者的速度大约是后者的2~3倍^[20].QFP波速度更高可能有两方面的原因:(1)因为快磁声波速度随离活动区

中心的距离增加而快速下降, 所以靠活动区中心更近的QFP波自然比离活动区中心远的EUV波具有更高的速度; (2) 由于171 Å等离子体在大气密度重力分层作用下随高度增加密度快速下降, 因此快磁声波速度随高度增加快速升高, 进而导致QFP波具有较高的传播速度^[13,135].

QFP波的波动周期通常跟与其相关的耀斑脉动周期部分或全部相似, 这表明二者可能是由同一物理过程所激发^[19~23,137]. 因为耀斑准周期脉动的研究历史较长, 所以可以根据研究较为成熟的耀斑准周期脉动形成机制类推QFP波的激发机制. 耀斑准周期脉动的形成机制包括磁位形共振、扰动的色散式演化、磁重联中的非线性过程以及从其他大气层次泄漏到日冕中的振荡等^[138]. 磁位形共振机制通常与冕环长周期整体振荡相关, 不会激发准周期波; 而其余3种机制都可激发QFP波. 大多数QFP波的激发可能与引发耀斑的磁重联过程中的非线性物理过程密切相关^[21,23,25,137,139], 例如电流片中等离子体团的分裂、合并和喷射^[140,141]以及振荡重联等^[142]. 同时, 部分观测结果显示, 太阳爆发扰动在非均匀介质中通过色散式演化^[24,94,95], 而光球压力模向上泄漏到日冕^[21,22]也是激发QFP波的一种可能机制.

关于QFP波的数值模拟工作主要研究了磁重联过程中的非线性物理过程. Yang等人^[143]发现, QFP波是由磁重联出流区的等离子体团与附近的磁场发生碰撞而激发; 生成的波列具有明显的色散性, 传播速度高达1000 km/s. Takasao和Shibata^[144]发现, QFP波是由耀斑环顶的一个充满蒸发等离子体区域内的振荡所激发, 该区域的振荡受控于重联出流与环顶作用后的回流. Pascoe等人^[134,145]使用腊肠模和扭结模快磁声波在高密度漏斗状泄漏型波导结构中传播对QFP波的形成进行了模拟. 由于快磁声波的色散性, 它将在漏斗状波导内形成准周期波列. 当波动在波导边界处的入射角大于全内反射角, 且波长大于截止波长时, 波导内传播的快磁声波波列将被泄漏到波导外. 因为磁场随高度增加而快速减小, 泄漏后的波列在折射作用下也将继续向上传播, 研究者认为这些从波导中泄漏的波列对应于日冕中观测到的QFP波.

3 总结和展望

EUV波和QFP波是低日冕中常见的两类大尺度极紫外波动现象, 本文系统地介绍了它们的观测特征、

物理特性以及理论解释和模型. 过去20多年以来, 大量研究工作都集中在讨论EUV波的驱动机制和物理本质, 并依据观测到的波动和非波动现象分别提出了多种波动和非波动模型. 近年来的高分辨、多波段和多视角观测数据分析结果有力地促进了人们对EUV波驱动源和物理本质的理解, 并逐步达成共识. 目前, 由于越来越多的观测事例表明EUV波中的快慢二分量结构, 人们普遍认识到对EUV波的理解不能单一地采用波动或非波动模型, 而应采用同时包含波动和非波成分的混合模型. 过去多年研究取得的进展使得人们对EUV波的研究进入了一个新的阶段, 未来仍有许多问题亟待解决. 另外, 由于QFP波发现较晚, 目前对它的研究还比较粗浅. 针对两类日冕大尺度极紫外波的研究现状和发展趋势, 未来对日冕极紫外波的研究可集中在如下几个方面.

(1) 大量观测表明, EUV波是由CME爆发初期泡状结构的快速膨胀及抛射所激发. 然而并非所有的CME都伴随EUV波, 同时一部分EUV波事件中并没有相关的CME. 这是观测灵敏度的原因还是有其他物理原因有待进一步的观测和理论论证, 并定量考察CME在何时、何地以及什么条件下才可以激发EUV波. EUV波还有其他一些可能的激发机制, 比如耀斑脉冲激发、等离子体喷流激发以及爆发暗条螺旋结构解缠膨胀运动激发等. 将来的观测和理论研究可在这些方面投入更多的努力.

(2) 对于QFP波, 大多数观测表明它的形成与耀斑准周期脉动紧密相关, 二者可能是通过同一物理过程激发. 但是具体是什么物理过程以及什么物理条件导致QFP波的形成目前并不清楚, 需要进一步的观测和理论研究. 另外还需要特别关注那些非耀斑准周期脉动相关的日冕准周期波事件的形成过程和激发机制, 比如宽谱扰动的色散式演化以及太阳其他大气层次振荡的泄漏等.

(3) EUV波快慢二分量的确认使得将来可采用冕震学的方法, 利用快波分量的波动性正确反演全球日冕磁场和温度等难以进行直接测量的日冕参量. 对于慢速分量, 其物理本质还存在争论, 有待进一步证实. 因此, 如果要利用慢速分量开展冕震学反演研究, 必须先研究清楚它的物理本质. 如果是CME爆发中磁场重构导致的表观波动, 则可以利用它来对CME的磁场结构和演化进行诊断; 如果是慢磁声波, 则可以用来诊断日冕等离子体性质.

(4) EUV波快慢二分量的确认还有另一层意义. 由于以往的统计研究并未区别EUV波的快慢分量, 将所有波动和非波动的扰动都纳入统计, 因此, 以往的统计研究在EUV波各物理参量, 与射电II型暴、耀斑、CME等现象的相关性方面存在较大偏差, 造成研究人员在辨别EUV波物理性质和驱动机制等方面的误判. 因此有必要采用AIA高分辨全日面数据EUV波快速和慢速分量分别进行统计, 从而提高人们对EUV波物理性质的正确理解, 进而建立可靠模型.

(5) 研究并建立太阳大气不同高度全球性传播大尺度扰动现象之间的物理关系, EUV波和太阳高能粒子事件以及射电II型暴等之间的关系. 研究EUV波与其他日冕结构的相互作用和波动的能量转化等物理过程, 探究EUV波在什么物理条件下可导致暗条或冕环发生何种模式的振荡、触发连续太阳(爆发)活动以及发生反射、折射、穿越和波模转换等波动现象.

(6) 研究QFP波的传播性质(比如为什么它仅沿磁力线传播而不能跨越磁力线), 射电响应信号, QFP波与EUV波、CME、耀斑的关系, 以及对日冕加热和太阳风加速的贡献等.

上述日冕极紫外波相关问题的解决, 有赖于未来

太阳观测设备和研究方法的进步. 极紫外波可在从射电到X射线较宽的波段上产生响应信号(极紫外波段最强), 对其进行全面的详细研究需要各波段高时空分辨观测数据的配合. 目前, 对极紫外波的观测主要集中在极紫外波段的成像观测, 而光谱观测较少. 为全面理解极紫外波, 未来需要发展大视场、高时间、高空间和高光谱分辨的极紫外光谱观测设备, 以及包括从射电到软X射线波段的大视场、多视角常规观测设备. 欧洲空间局2019年发射的太阳轨道飞行器(Solar Orbiter)、日本的太阳-C(Solar-C)计划以及我国即将发射的太阳先进天基天文台(Advanced Space-based Solar Observatory)等卫星上搭载的极紫外成像和光谱设备将对理解极紫外波起到重要的推进作用. 一些地面大型太阳望远镜(例如美国的Daniel K. Inouye太阳望远镜、Goode太阳望远镜以及我国的新真空太阳望远镜)在光球和色球的高时空分辨率数据可对了解极紫外波的源区起到重要作用. 数据分析方法方面, 以往的研究大多都是人工选取事例进行个例和小样本统计分析; 未来需要开发高效率的自动探测方法和机器学习软件进行大样本的统计研究, 以全面认识极紫外波的激发条件、物理性质以及与其他太阳活动现象之间的关系.

参考文献

- Chen P F. Coronal mass ejections: Models and their observational basis. *Liv Rev Solar Phys*, 2011, 8: 1
- Moreton G E. H α observations of flare-initiated disturbances with velocities ~ 1000 km/sec. *Astrophys J*, 1960, 65: 494
- Chen P F. Global coronal waves. In: Keiling A, Lee D H, Nakariakov V, eds. *Low-Frequency Waves in Space Plasmas*. Washington DC: American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, 2016, 216: 381–394
- Uchida Y. Propagation of hydromagnetic disturbances in the solar corona and Moreton's wave phenomenon. *Sol Phys*, 1968, 4: 30–44
- Tsuneta S, Acton L, Bruner M, et al. The soft X-ray telescope for the solar—A mission. *Sol Phys*, 1991, 136: 37–67
- Delaboudinière J P, Artzner G E, Brunaud J, et al. EIT: Extreme-ultraviolet imaging telescope for the SOHO mission. *Sol Phys*, 1995, 162: 291–312
- Thompson B J, Plunkett S P, Gurman J B, et al. SOHO/EIT observations of an earth-directed coronal mass ejection on May 12, 1997. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 2465–2468
- Wang Y M. EIT waves and fast-mode propagation in the solar corona. *Astrophys J*, 2000, 543: L89–L93
- Ofman L, Thompson B J. Interaction of EIT waves with coronal active regions. *Astrophys J*, 2002, 574: 440–452
- Delannée C, Aulanier G. CME associated with transequatorial loops and a bald patch flare. *Sol Phys*, 1999, 190: 107–129
- Delannée C. Another view of the EIT wave phenomenon. *Astrophys J*, 2000, 545: 512–523
- Vršnak B, Cliver E W. Origin of coronal shock waves. *Sol Phys*, 2008, 253: 215–235
- Liu W, Ofman L. Advances in observing various coronal EUV waves in the SDO era and their seismological applications. *Sol Phys*, 2014, 289: 3233–3277
- Warmuth A. Large-scale globally propagating coronal waves. *Living Rev Sol Phys*, 2015, 12: 3–104
- Kaiser M L, Kucera T A, Davila J M, et al. The STEREO mission: An introduction. *Space Sci Rev*, 2008, 136: 5–16
- Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Sol Phys*, 2012, 275: 3–15
- Patsourakos S, Vourlidas A. On the nature and genesis of EUV waves: A synthesis of observations from SOHO, STEREO, SDO, and HINODE. *Sol Phys*, 2012, 281: 187–222

- 18 Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Sol Phys*, 2012, 275: 17–40
- 19 Liu W, Title A M, Zhao J, et al. Direct imaging of quasi-periodic fast propagating waves of $\sim 2000 \text{ km s}^{-1}$ in the low solar corona by the solar dynamics observatory atmospheric imaging assembly. *Astrophys J*, 2011, 736: L13
- 20 Liu W, Ofman L, Nitta N V, et al. Quasi-periodic fast-mode wave trains within a global EUV wave and sequential transverse oscillations detected by SDO/AIA. *Astrophys J*, 2012, 753: 52–69
- 21 Shen Y, Liu Y. Observational study of the quasi-periodic fast-propagating magnetosonic waves and the associated flare on 2011 May 30. *Astrophys J*, 2012, 753: 53–65
- 22 Shen Y D, Liu Y, Su J T, et al. Observations of a quasi-periodic, fast-propagating magnetosonic wave in multiple wavelengths and its interaction with other magnetic structures. *Sol Phys*, 2013, 288: 585–602
- 23 Shen Y, Liu Y, Song T, et al. A quasi-periodic fast-propagating magnetosonic wave associated with the eruption of a magnetic flux rope. *Astrophys J*, 2018, 853: 1–3
- 24 Shen Y, Song T, Liu Y. Dispersively formed quasi-periodic fast magnetosonic wavefronts due to the eruption of a nearby mini-filament. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 477: L6–L10
- 25 Yuan D, Shen Y, Liu Y, et al. Distinct propagating fast wave trains associated with flaring energy releases. *Astron Astrophys*, 2013, 554: A144
- 26 Zheng R, Xue Z, Chen Y, et al. The initial morphologies of the wavefronts of extreme ultraviolet waves. *Astrophys J*, 2019, 871: 232–241
- 27 Hu H, Liu Y D, Zhu B, et al. Effects of coronal density and magnetic field distributions on a global solar EUV wave. *Astrophys J*, 2019, 878: 106–116
- 28 Biesecker D A, Myers D C, Thompson B J, et al. Solar phenomena associated with “EIT waves”. *Astrophys J*, 2002, 569: 1009–1015
- 29 Thompson B J, Myers D C. A catalog of coronal “EIT wave” transients. *Astrophys J Suppl Ser*, 2009, 183: 225–243
- 30 Warmuth A, Vršnak B, Magdalenic J, et al. A multiwavelength study of solar flare waves. *Astron Astrophys*, 2004, 418: 1117–1129
- 31 Harra L K, Sterling A C. Imaging and spectroscopic investigations of a solar coronal wave: Properties of the wave front and associated erupting material. *Astrophys J*, 2003, 587: 429–438
- 32 Zhukov A N, Auchère F. On the nature of EIT waves, EUV dimmings and their link to CMEs. *Astron Astrophys*, 2004, 427: 705–716
- 33 Chen P F, Wu Y. First evidence of coexisting eit wave and coronal moreton wave from SDO/AIA observations. *Astrophys J*, 2011, 732: L20
- 34 Shen Y, Liu Y. Simultaneous observations of a large-scale wave event in the solar atmosphere: From photosphere to corona. *Astrophys J*, 2012, 752: L23
- 35 Shen Y, Liu Y, Su J, et al. Diffraction, refraction, and reflection of an extreme-ultraviolet wave observed during its interactions with remote active regions. *Astrophys J*, 2013, 773: L33
- 36 Kumar P, Cho K S, Chen P F, et al. Multiwavelength study of a solar eruption from ar NOAA 11112: Ii. Large-scale coronal wave and loop oscillation. *Sol Phys*, 2013, 282: 523–541
- 37 Guo Y, Ding M D, Chen P F. Slow patchy extreme-ultraviolet propagating fronts associated with fast coronal magneto-acoustic waves in solar eruptions. *Astrophys J Suppl Ser*, 2015, 219: 36–52
- 38 Chen P F, Wu S T, Shibata K, et al. Evidence of EIT and moreton waves in numerical simulations. *Astrophys J*, 2002, 572: L99–L102
- 39 Chen P F, Fang C, Shibata K. A full view of EIT waves. *Astrophys J*, 2005, 622: 1202–1210
- 40 Hudson H S, Khan J I, Lemen J R, et al. Soft X-ray observation of a large-scale coronal wave and its exciter. *Sol Phys*, 2003, 212: 121–149
- 41 Gilbert H R, Holzer T E. Chromospheric waves observed in the He^1 spectral line ($\lambda = 10830 \text{ \AA}$): A closer look. *Astrophys J*, 2004, 610: 572–587
- 42 Narukage N, Ishii T T, Nagata S, et al. Three successive and interacting shock waves generated by a solar flare. *Astrophys J*, 2008, 684: L45–L49
- 43 Patsourakos S, Vourlidas A, Kliem B. Toward understanding the early stages of an impulsively accelerated coronal mass ejection. *Astron Astrophys*, 2010, 522: A100
- 44 Shen Y, Liu Y. Evidence for the wave nature of an extreme ultraviolet wave observed by the atmospheric imaging assembly on board the solar dynamics observatory. *Astrophys J*, 2012, 754: 7
- 45 Shen Y, Chen P F, Liu Y D, et al. First unambiguous imaging of large-scale quasi-periodic extreme-ultraviolet wave or shock. *Astrophys J*, 2019, 873: 22–35
- 46 Liu W, Nitta N V, Schrijver C J, et al. First SDO AIA observations of a global coronal EUV “wave”: Multiple components and “ripples”. *Astrophys J*, 2010, 723: L53–L59
- 47 Veronig A M, Muhr N, Kienreich I W, et al. First observations of a dome-shaped large-scale coronal extreme-ultraviolet wave. *Astrophys J*, 2010, 716: L57–L62
- 48 Ma S, Raymond J C, Golub L, et al. Observations and interpretation of a low coronal shock wave observed in the EUV by the SDO/AIA. *Astrophys J*, 2011, 738: 160–170
- 49 Mann G, Jansen F, MacDowall R J, et al. A heliospheric density model and type III radio bursts. *Astron Astrophys*, 1999, 348: 614–620
- 50 Kienreich I W, Temmer M, Veronig A M. STEREO quadrature observations of the three-dimensional structure and driver of a global coronal

- wave. *Astrophys J*, 2009, 703: L118–L122
- 51 Patsourakos S, Vourlidas A. “Extreme ultraviolet waves” are waves: First quadrature observations of an extreme ultraviolet wave from STEREO. *Astrophys J*, 2009, 700: L182–L186
- 52 Cheng X, Zhang J, Olmedo O, et al. Investigation of the formation and separation of an extreme-ultraviolet wave from the expansion of a coronal mass ejection. *Astrophys J*, 2012, 745: L5
- 53 Mei Z X, Keppens R, Cai Q W, et al. 3D numerical experiment for EUV waves caused by flux rope eruption. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2020, 493: 4816–4829
- 54 Patsourakos S, Vourlidas A, Wang Y M, et al. What is the nature of EUV waves? First STEREO 3D observations and comparison with theoretical models. *Sol Phys*, 2009, 259: 49–71
- 55 Delannée C, Artzner G, Schmieder B, et al. Time evolution of the altitude of an observed coronal wave. *Sol Phys*, 2014, 289: 2565–2585
- 56 Khan J I, Aurass H. X-ray observations of a large-scale solar coronal shock wave. *Astron Astrophys*, 2002, 383: 1018–1031
- 57 Narukage N, Hudson H S, Morimoto T, et al. Simultaneous observation of a moreton wave on 1997 November 3 in H α and soft X-rays. *Astrophys J*, 2002, 572: L109–L112
- 58 Warmuth A, Mann G, Aurass H. First soft X-ray observations of global coronal waves with the GOES Solar X-Ray Imager. *Astrophys J*, 2005, 626: L121–L124
- 59 Kwon R Y, Ofman L, Olmedo O, et al. STEREO observations of fast magnetosonic waves in the extended solar corona associated with EIT/EUV waves. *Astrophys J*, 2013, 766: 55–67
- 60 Wang J, Yan X, Kong D, et al. A small-scale filament eruption inducing a Moreton wave, an EUV wave, and a coronal mass ejection. *Astrophys J*, 2020, 894: 30–49
- 61 Vršnak B, Warmuth A, Brajša R, et al. Flare waves observed in Helium I 10 830 Å. *Astron Astrophys*, 2002, 394: 299–310
- 62 Vršnak B, Magdalenic J, Temmer M, et al. Broadband metric-range radio emission associated with a Moreton/EIT wave. *Astrophys J*, 2005, 625: L67–L70
- 63 Warmuth A, Vršnak B, Magdalenic J, et al. A multiwavelength study of solar flare waves. *Astron Astrophys*, 2004, 418: 1101–1115
- 64 White S M, Thompson B J. High-cadence radio observations of an EIT wave. *Astrophys J*, 2005, 620: L63–L66
- 65 Warmuth A, Shibasaki K, Iwai K, et al. Microwave observations of a large-scale coronal wave with the Nobeyama Radioheliograph. *Astron Astrophys*, 2016, 593: A102
- 66 Vršnak B, Žic T, Lulić S, et al. Formation of coronal large-amplitude waves and the chromospheric response. *Sol Phys*, 2016, 291: 89–115
- 67 Krause G, Cécere M, Zurbriggen E, et al. Are CMEs capable of producing moreton waves? A case study: The 2006 December 6 event. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 474: 770–778
- 68 Long D M, Jenkins J, Valori G. Quantifying the relationship between Moreton-Ramsey waves and “EIT waves” using observations of four homologous wave events. *Astrophys J*, 2019, 882: 90–100
- 69 Klassen A, Pohjolainen S, Klein K L. Type II radio precursor and X-ray flare emission. *Sol Phys*, 2003, 218: 307–310
- 70 Nitta N V, Schrijver C J, Title A M, et al. Large-scale coronal propagating fronts in solar eruptions as observed by the atmospheric imaging assembly on board the solar dynamics observatory—An ensemble study. *Astrophys J*, 2013, 776: 58–71
- 71 Muhr N, Veronig A M, Kienreich I W, et al. Statistical analysis of large-scale EUV waves observed by STEREO/EUVI. *Sol Phys*, 2014, 289: 4563–4588
- 72 Warmuth A, Vršnak B, Aurass H, et al. Evolution of two EIT/h α moreton waves. *Astrophys J*, 2001, 560: L105–L109
- 73 Long D M, Murphy P, Graham G, et al. A statistical analysis of the solar phenomena associated with global EUV waves. *Sol Phys*, 2017, 292: 185–219
- 74 Warmuth A, Mann G. A model of the Alfvén speed in the solar corona. *Astron Astrophys*, 2005, 435: 1123–1135
- 75 Warmuth A, Mann G. Kinematical evidence for physically different classes of large-scale coronal EUV waves. *Astron Astrophys*, 2011, 532: A151
- 76 Muhr N, Veronig A M, Kienreich I W, et al. Analysis of characteristic parameters of large-scale coronal waves observed by the Solar-Terrestrial Relations Observatory/Extreme Ultraviolet Imager. *Astrophys J*, 2011, 739: 89–103
- 77 Long D M, DeLuca E E, Gallagher P T. The wave properties of coronal bright fronts observed using SDO/AIA. *Astrophys J*, 2011, 741: L21
- 78 Kienreich I W, Veronig A M, Muhr N, et al. Case study of four homologous large-scale coronal waves observed on 2010 April 28 and 29. *Astrophys J*, 2011, 727: L43–L49
- 79 Li T, Zhang J, Yang S, et al. SDO/AIA observations of secondary waves generated by interaction of the 2011 June 7 global EUV wave with solar coronal structures. *Astrophys J*, 2012, 746: L13–L22
- 80 Harra L K, Sterling A C, Gömöry P, et al. Spectroscopic observations of a coronal moreton wave. *Astrophys J*, 2011, 737: L4
- 81 Veronig A M, Gömöry P, Kienreich I W, et al. Plasma diagnostics of an EIT wave observed by Hinode/EIS and SDO/AIA. *Astrophys J*, 2011, 743: L10

- 82 Schrijver C J, Aulanier G, Title A M, et al. The 2011 February 15×2 flare ribbons, coronal front, and mass ejection: Interpreting the three-dimensional views from the solar dynamics observatory and STEREO guided by magnetohydrodynamic flux-rope modeling. *Astrophys J*, 2011, 738: 167–190
- 83 Asai A, Hara H, Watanabe T, et al. Strongly blueshifted phenomena observed with Hinode EIS in the 2006 December 13 solar flare. *Astrophys J*, 2008, 685: 622–628
- 84 Kozarev K A, Korreck K E, Lobzin V V, et al. Off-limb solar coronal wavefronts from SDO/AIA extreme-ultraviolet observations—Implications for particle production. *Astrophys J*, 2011, 733: L25
- 85 Ballai I, Erdélyi R, Pintér B. On the nature of coronal EIT waves. *Astrophys J*, 2005, 633: L145–L148
- 86 Zhang Y, Kitai R, Narukage N, et al. Propagation of moreton waves. *Publ Astron Soc Jpn*, 2011, 63: 685–696
- 87 Vršnak B, Warmuth A, Temmer M, et al. Multi-wavelength study of coronal waves associated with the CME-flare event of 3 November 2003. *Astron Astrophys*, 2006, 448: 739–752
- 88 Chen P F. The relation between EIT waves and solar flares. *Astrophys J*, 2006, 641: L153–L156
- 89 Patsourakos S, Vourlidas A, Stenborg G. The genesis of an impulsive coronal mass ejection observed at ultra-high cadence by AIA on SDO. *Astrophys J*, 2010, 724: L188–L193
- 90 Shen Y, Liu Y, Tian Z, et al. On a small-scale EUV wave: The driving mechanism and the associated oscillating filament. *Astrophys J*, 2017, 851: 101–122
- 91 Kumar P, Manoharan P K. Eruption of a plasma blob, associated M-class flare, and large-scale extreme-ultraviolet wave observed by SDO. *Astron Astrophys*, 2013, 553: A109
- 92 Zheng R, Jiang Y, Yang J, et al. An extreme-ultraviolet wave associated with a surge. *Astrophys J*, 2013, 764: 70–77
- 93 Zheng R, Jiang Y, Yang J, et al. An extreme ultraviolet wave associated with a micro-sigmoid eruption. *Astrophys J*, 2012, 753: L29
- 94 Shen Y, Tang Z, Li H, et al. Coronal EUV, QFP, and kink waves simultaneously launched during the course of jet-loop interaction. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 480: L63–L67
- 95 Shen Y, Tang Z, Miao Y, et al. EUV waves driven by the sudden expansion of transequatorial loops caused by coronal jets. *Astrophys J*, 2018, 860: L8
- 96 Shen Y, Liu Y, Liu Y D, et al. Homologous large-amplitude nonlinear fast-mode magnetosonic waves driven by recurrent coronal jets. *Astrophys J*, 2018, 861: 105–169
- 97 Su W, Cheng X, Ding M D, et al. A type II radio burst without a coronal mass ejection. *Astrophys J*, 2015, 804: 88–97
- 98 Gopalswamy N, Yashiro S, Temmer M, et al. EUV wave reflection from a coronal hole. *Astrophys J*, 2009, 691: L123–L127
- 99 Dai Y, Ding M D, Chen P F, et al. Quadrature observations of wave and non-wave components and their decoupling in an extreme-ultraviolet wave event. *Astrophys J*, 2012, 759: 55–63
- 100 Olmedo O, Vourlidas A, Zhang J, et al. Secondary waves and/or the “reflection” from and “transmission” through a coronal hole of an extreme ultraviolet wave associated with the 2011 February 15×2.2 flare observed with SDO/AIA and STEREO/EUVI. *Astrophys J*, 2012, 756: 143–156
- 101 Yang L, Zhang J, Liu W, et al. SDO/AIA and HINODE/EIS observations of interaction between an EUV wave and active region loops. *Astrophys J*, 2013, 775: 39–51
- 102 Xue Z K, Qu Z Q, Yan X L, et al. Deformation and deceleration of coronal wave. *Astron Astrophys*, 2013, 556: A152
- 103 Liu R, Wang Y, Lee J, et al. Impacts of EUV wavefronts on coronal structures in homologous coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2019, 870: 15–33
- 104 Kienreich I W, Muhr N, Veronig A M, et al. Solar Terrestrial Relations Observatory-A (STEREO-A) and Project For On-Board Autonomy 2 (PROBA2) quadrature observations of reflections of three EUV waves from a coronal hole. *Sol Phys*, 2013, 286: 201–219
- 105 Delannée C, Hochedez J F, Aulanier G. Stationary parts of an EIT and moreton wave: A topological model. *Astron Astrophys*, 2007, 465: 603–612
- 106 Attrill G D R, Harra L K, van Driel-Gesztelyi L, et al. Coronal “wave”: Magnetic footprint of a coronal mass ejection? *Astrophys J*, 2007, 656: L101–L104
- 107 Chandra R, Chen P F, Fulara A, et al. Peculiar stationary EUV wave fronts in the eruption on 2011 May 11. *Astrophys J*, 2016, 822: 106–114
- 108 Chen P F, Fang C, Chandra R, et al. Can a fast-mode EUV wave generate a stationary front? *Sol Phys*, 2016, 291: 3195–3206
- 109 Zong W, Dai Y. Mode conversion of a solar extreme-ultraviolet wave over a coronal cavity. *Astrophys J*, 2017, 834: L15
- 110 Arregui I, Oliver R, Ballester J L. Prominence oscillations. *Living Rev Sol Phys*, 2018, 15: 3–157
- 111 Liu R, Liu C, Xu Y, et al. Observation of a moreton wave and wave-filament interactions associated with the renowned x9 flare on 1990 May 24. *Astrophys J*, 2013, 773: 166–179
- 112 Shen Y, Ichimoto K, Ishii T T, et al. A chain of winking (oscillating) filaments triggered by an invisible extreme-ultraviolet wave. *Astrophys J*, 2014, 786: 151–163
- 113 Zhang Q M, Ji H S. Vertical oscillation of a coronal cavity triggered by an EUV wave. *Astrophys J*, 2018, 860: 113–123

- 114 Shen Y, Liu Y D, Chen P F, et al. Simultaneous transverse oscillations of a prominence and a filament and longitudinal oscillation of another filament induced by a single shock wave. *Astrophys J*, 2014, 795: 130–144
- 115 Pant V, Mazumder R, Yuan D, et al. Simultaneous longitudinal and transverse oscillations in an active-region filament. *Sol Phys*, 2016, 291: 3303–3315
- 116 Wu S T, Li B, Wang S, et al. A three-dimensional analysis of global propagation of magnetohydrodynamic (MHD) waves in a structured solar atmosphere. *J Geophys Res*, 2005, 110: A11102
- 117 Schmidt J M, Ofman L. Global simulation of an extreme ultraviolet imaging telescope wave. *Astrophys J*, 2010, 713: 1008–1015
- 118 Downs C, Roussev I I, van der Holst B, et al. Studying extreme ultraviolet wave transients with a digital laboratory: Direct comparison of extreme ultraviolet wave observations to global magnetohydrodynamic simulations. *Astrophys J*, 2011, 728: 2–17
- 119 Wills-Davey M J, DeForest C E, Stenflo J O. Are “EIT waves” fast-mode MHD waves? *Astrophys J*, 2007, 664: 556–562
- 120 Podladchikova O, Vourlidas A, Van der Linden R A M, et al. Extreme ultraviolet observations and analysis of micro-eruptions and their associated coronal waves. *Astrophys J*, 2010, 709: 369–376
- 121 Wang H, Shen C, Lin J. Numerical experiments of wave-like phenomena caused by the disruption of an unstable magnetic configuration. *Astrophys J*, 2009, 700: 1716–1731
- 122 Delannée C, Török T, Aulanier G, et al. A new model for propagating parts of EIT waves: A current shell in a CME. *Sol Phys*, 2008, 247: 123–150
- 123 Aschwanden M J. 4-D modeling of CME expansion and EUV dimming observed with STEREO/EUVI. *Ann Geophys*, 2009, 27: 3275–3286
- 124 Ma S, Wills-Davey M J, Lin J, et al. A new view of coronal waves from STEREO. *Astrophys J*, 2009, 707: 503–509
- 125 Xie X, Mei Z, Huang M, et al. Numerical experiments of various types of disturbances in the low and middle corona caused by solar eruptions. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2019, 490: 2918–2935
- 126 Pomoell J, Vainio R, Kissmann R. MHD modeling of coronal large-amplitude waves related to CME lift-off. *Sol Phys*, 2008, 253: 249–261
- 127 Chen P F. The relation between EIT waves and coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2009, 698: L112–L115
- 128 Karlický M, Mészáros H, Jelínek P. Radio fiber bursts and fast magnetoacoustic wave trains. *Astron Astrophys*, 2013, 550: A1
- 129 Qu Z N, Jiang L Q, Chen S L. Observations of a fast-mode magnetosonic wave propagating along a curving coronal loop on 2011 November 11. *Astrophys J*, 2017, 851: 41–50
- 130 Miao Y H, Liu Y, Shen Y D, et al. A quasi-periodic propagating wave and extreme-ultraviolet waves excited simultaneously in a solar eruption event. *Astrophys J*, 2019, 871: L2
- 131 Miao Y, Liu Y, Elmhamdi A, et al. Two quasi-periodic fast-propagating magnetosonic wave events observed in active region NOAA 11167. *Astrophys J*, 2020, 889: 139–153
- 132 Roberts B, Edwin P M, Benz A O. Fast pulsations in the solar corona. *Nature*, 1983, 305: 688–690
- 133 Ofman L, Liu W. Quasi-periodic counter-propagating fast magnetosonic wave trains from neighboring flares: SDO/AIA Observations and 3D MHD Modeling. *Astrophys J*, 2018, 860: 54–70
- 134 Pascoe D J, Nakariakov V M, Kupriyana E G. Fast magnetoacoustic wave trains in magnetic funnels of the solar corona. *Astron Astrophys*, 2013, 560: A97
- 135 Ofman L, Liu W, Title A, et al. Modeling super-fast magnetosonic waves observed by SDO in active region funnels. *Astrophys J*, 2011, 740: L33
- 136 Pascoe D J, Goddard C R, Nakariakov V M. Dispersive evolution of nonlinear fast magnetoacoustic wave trains. *Astrophys J*, 2017, 847: L21
- 137 Nisticò G, Pascoe D J, Nakariakov V M. Observation of a high-quality quasi-periodic rapidly propagating wave train using SDO/AIA. *Astron Astrophys*, 2014, 569: A12–A20
- 138 Nakariakov V M, Melnikov V F. Quasi-periodic pulsations in solar flares. *Space Sci Rev*, 2009, 149: 119–151
- 139 Li L, Zhang J, Peter H, et al. Quasi-periodic fast propagating magnetoacoustic waves during the magnetic reconnection between solar coronal loops. *Astrophys J*, 2018, 868: L33
- 140 Kliem B, Karlický M, Benz A O. Solar flare radio pulsations as a signature of dynamic magnetic reconnection. *Astron Astrophys*, 2000, 360: 715–728
- 141 Ni L, Kliem B, Lin J, et al. Fast magnetic reconnection in the solar chromosphere mediated by the plasmoid instability. *Astrophys J*, 2015, 799: 79–95
- 142 McLaughlin J A, De Moortel I, Hood A W, et al. Nonlinear fast magnetoacoustic wave propagation in the neighbourhood of a 2D magnetic X-point: Oscillatory reconnection. *Astron Astrophys*, 2009, 493: 227–240
- 143 Yang L, Zhang L, He J, et al. Numerical simulation of fast-mode magnetosonic waves excited by plasmoid ejections in the solar corona. *Astrophys J*, 2015, 800: 111–120
- 144 Takasao S, Shibata K. Above-the-loop-top oscillation and quasi-periodic coronal wave generation in solar flares. *Astrophys J*, 2016, 823: 150–161
- 145 Pascoe D J, Nakariakov V M, Kupriyana E G. Fast magnetoacoustic wave trains in coronal holes. *Astron Astrophys*, 2014, 568: A20

Summary for “日冕极紫外波研究进展”

Research progress on coronal extreme ultraviolet waves

Yuandeng Shen^{1*}, Bo Li², Pengfei Chen³, Xinping Zhou¹ & Yu Liu¹

¹ Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

² School of Space and Physics, Shandong University, Weihai 264209, China;

³ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

* Corresponding author, E-mail: ydshen@ynao.ac.cn

The hot, tenuous coronal plasma medium can support the propagation of various kinds of magnetohydrodynamic (MHD) waves, such as Alfvén waves, fast and slow magnetosonic waves. These MHD waves are important for understanding the enigmatic problems of coronal heating and the acceleration of solar winds, as well as the basic physical property of the solar atmosphere and the physics behind solar eruptions. In this review, we mainly introduce two types of fast-propagating extreme ultraviolet (EUV) magnetosonic waves in the corona, namely, the large-scale (global) EUV waves and the quasi-periodic fast-propagating (QFP) magnetosonic waves. EUV waves are large-scale propagating disturbances in the corona; they are intimately related to violent solar eruptions such as flares, coronal mass ejections (CME), and radio type II bursts. In history, large-scale propagating disturbances were firstly discovered in the chromosphere in 1960s, and they were called Moreton waves. In theory, the dense chromosphere can not support the fast propagating of Moreton waves. Therefore solar physicists explained Moreton waves as the chromosphere responses of fast magnetosonic or shock waves in the corona, although people did not detected corona waves in that era due to the lack of coronal observations. Until the 1990s, the long-expected similar large-scale fast-propagating coronal disturbances called EUV waves were observed by the Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) onboard the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). EUV waves were initially thought to be fast mode magnetosonic waves driven by flare pressure pulses, and can be regarded as the coronal counterparts of Moreton waves. However, latter observations raised questions about their driving mechanism and physical nature. For their driving source it was unclear that EUV waves are driven by flare pressure pulses or CMEs. For their physical nature it was unclear that EUV waves are true MHD waves or apparent motions caused by reconfiguration of large-scale coronal magnetic fields or other mechanisms. Thanks to the high spatiotemporal resolution and multi-angle observations provided by the Solar Terrestrial Relations observatory (STEREO) and the Solar Dynamics Observatory (SDO) in recent years, we have achieved a deeper and complete understanding about the generation and physical properties of EUV waves. A common consensus reached in recent years is that at least two types of EUV waves can be detected during the eruption of a CME. One is a fast mode magnetosonic wave or shock at a speed ranged from several hundred to more than one thousand km/s, which corresponds to the coronal counterpart of a chromosphere Moreton wave; the other one whose physical nature is unclear, propagates following the fast one with a low speed generally below 500 km/s. For the driving sources of EUV waves, the majority of high resolution observations showed that they are driven by the lateral expansion of CMEs, and a few studies suggested that they can also be excited by other mechanisms such as flare pressure pulses, sudden loop expansion caused by ambient solar eruptions, coronal jets, and expanding motions of unwinding helical structure of filaments. The high spatiotemporal resolution observations taken by the SDO discovered a new type of fast mode waves called QFP waves, which have multiple wavefronts and generally propagate along magnetic field lines with a speed in the range of several hundred to more than 2000 km/s, and their periods are often similar to the quasi-periodic pulsations in the associate flares. Here we present a summary of the recent research progress about the two types of EUV waves in the corona, and try to point out the key and difficult issues, as well as the possible research topics in the future.

solar activities, solar magnetic fields, flares, coronal mass ejections (CMEs), magnetohydrodynamics waves

doi: [10.1360/TB-2020-0748](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0748)