

博士后文库  
中国博士后科学基金资助出版

# 日冕极紫外波的产生和传播

汪红娟 林隽 刘四清 杨丽恒 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 日冕极紫外波的产生和传播

汪红娟 林 隽 刘四清 杨丽恒 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

剧烈太阳活动发生时,尤其是日冕物质抛射爆发时,会在较短时间内抛出大量高能带电粒子流,这些高能物质会对空间天气造成强烈扰动,对地球周围的空间环境产生巨大的影响。与这些太阳高能事件密切相关的日冕极紫外波是发生在太阳日冕层很壮观的扰动现象。本书对日冕极紫外波的产生及其传播进行细致新颖的研究分析,对该研究领域的最新研究和创新成果进行讲解和探讨。这对日地空间环境、日地关系和空间天气学的研究具有重大的现实意义。

本书的读者对象为对太阳物理和空间物理相关领域进行学习或研究的本科生、研究生及学者。

### 图书在版编目(CIP)数据

日冕极紫外波的产生和传播/汪红娟等著. —北京:科学出版社,2017.5  
(博士后文库)

ISBN 978-7-03-053249-7

I. ①日… II. ①汪… III. ①日冕极紫外波-产生传播 IV. ①O123

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第536704号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:邹慧卿  
责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**北京建宏印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年5月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年5月第一次印刷 印张:8 插页:4

字数:156 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委(按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

## 《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

# 自 序

太阳爆发是发生在太阳大气中的迅速而激烈的能量转换和释放的现象，也一直是太阳物理学研究的热点课题。它的发生会对行星际空间甚至地球周围的空间环境(空间天气)造成剧烈扰动，并可能直接影响到我们人类的生存环境。爆发过程中产生的高能带电粒子和向外高速抛射的磁化等离子体能引起地球磁场和电离层的强烈扰动，导致短波无线电通信中断、供电系统损坏、空间飞行器发生故障、宇航员安全受到威胁等。我们不能控制太阳，但是可以通过研究太阳爆发的基本特征和内在的物理因素，了解爆发过程的机制，研究它什么时候发生、在什么地方发生、对空间天气有可能产生什么样的影响，从而事先采取相应的规避措施，减少甚至避免因太阳爆发给我们造成的损失。因此，研究太阳爆发不但具有非常重要的科学价值，而且还有极其明显的实用价值。

在太阳爆发过程中经常可以观测到向四周传播的极紫外(extreme ultraviolet, EUV)波，它是太阳爆发过程中迅速变化的日冕磁场结构对太阳中高层大气剧烈扰动的结果。因此，EUV波的起源和传播与爆发的磁场结构关系密切，通过研究EUV波，可为我们提供很多爆发磁结构的重要信息，帮助我们了解和反推爆发前的磁场结构的相关信息，为我们研究太阳爆发的前兆以及触发机制提供有利的依据，对建立太阳爆发的物理预报模型具有重要的参考价值。其次，EUV波在冕震学的研究方面有重要应用价值。通过研究EUV波的传播特征，可以帮助我们对整个日冕的磁场和等离子体状态做出诊断。利用EUV波的特征和性质，还可以间接获取日冕大气中一些难以直接测量得到的物理参量，如阿尔文速度和磁场强度等，而这些参量非常有助于我们正确理解和认识发生在日冕大气中的各种复杂物理过程。此外，EUV波还可以帮助我们理解日冕加热和高速太阳风的加速过程。由于在太阳爆发过程以及对周围环境的扰动的研究方面的重要意义，EUV波受到了太阳物理学家的特别重视。

本书的主要内容在基本观点上具有开拓性，在国际上首次提出EUV波的起源包含了太阳爆发过程中产生的慢模激波的贡献的观点，取得了若干原创性成果，受到了国际同行的普遍关注；随后又进一步指出EUV波起源的复杂性，强调了除慢模激波之外还有其他扰动源的EUV波多因一果的特点，将探讨EUV波的起源与物理本质的工作推到了一个更高的水平和阶段。在研究方法上，本书将理论研究、数值实验以及观测检验紧密地联系在一起，将各方面得到的结果进行对比分析，为深入研究EUV波的产生机制和传播特征提供了有效途径。本书不仅提供了EUV

波理论和观测研究的背景介绍,还对所使用的数值实验的方法进行分析,对今后的类似研究和实验具有较高价值的借鉴作用。本书内容安排系统,逻辑性很强,层次清晰,观点明确,为国内在太阳物理和空间物理领域学习的学生和学者提供了很好的参考。

林 隽

2017 年 1 月

# 前 言

本书主要研究分析日冕极紫外波的产生和传播过程,这是太阳物理和空间物理研究的重要内容之一。本书适用于对太阳物理和空间物理相关领域进行学习或研究的本科生和研究生。

作为宇宙中对我们最为重要的恒星,太阳与我们人类的生存和发展息息相关。同时,作为离我们最近的一颗恒星,太阳又给我们提供了研究恒星活动及其物理机制的唯一机会。当剧烈太阳活动事件发生时,尤其是日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 爆发时,会在较短时间内抛射出大量高能带电粒子流,这些高能物质会对空间天气造成强烈扰动,对地球周围的空间环境产生巨大的影响,与这些太阳高能事件密切相关的日冕极紫外波是发生在太阳日冕层的很壮观的扰动现象。对日冕极紫外波产生及传播的研究为我们进一步了解和认识日冕物质抛射产生的物理环境和爆发机制提供了很好的切入点。

本书第 1 章介绍日冕极紫外波的研究内容、发展现况和目前亟待解决的问题;第 2 章对一个重要的磁流体数值模拟程序——ZEUS-2D 进行简单介绍和说明;第 3、4 章分别是在两种不同密度分布的背景场中,利用 ZEUS-2D 程序,数值研究日冕极紫外波的产生和传播过程;第 5 章介绍日冕极紫外波细节演化特征的数值研究;第 6 章利用观测资料,结合理论研究和数值模拟,分析一个日冕极紫外波的观测事例。

参加本书撰写工作的有汪红娟、林隽、刘四清和杨丽恒。书中涉及的日冕极紫外波的数值模拟部分由汪红娟、林隽和刘四清来完成;观测事例部分由杨丽恒完成。本书由汪红娟主编、修改、统稿和定稿,并由林隽研究员审阅。

限于编者水平,疏漏和不妥之处定然难免,恳请读者批评指正。

编 者

2017 年 1 月



# 目 录

《博士后文库》序言

自序

前言

第 1 章	日冕 EUV 波研究概述	1
1.1	引言	1
1.2	日冕 EUV 波的观测特征	2
1.2.1	日冕 EUV 波的形态	2
1.2.2	日冕 EUV 波的运动学特征	4
1.2.3	日冕 EUV 波的多波段观测	7
1.2.4	日冕 EUV 波的三维结构	8
1.2.5	日冕 EUV 波与日冕结构的相互作用	13
1.3	日冕 EUV 波与太阳其他现象的关系	16
1.3.1	日冕 EUV 波与 CME 及耀斑的关系	16
1.3.2	日冕 EUV 波与 II 型射电暴的关系	18
1.3.3	日冕 EUV 波与色球莫尔顿波的关系	19
1.4	日冕 EUV 波的理论模型	20
1.4.1	快模波模型	21
1.4.2	磁力线连续拉伸模型	22
1.4.3	CME 侧翼驱动连续磁重联模型	24
1.4.4	电流壳模型	25
1.4.5	慢模波模型	26
1.4.6	孤立子波模型	26
1.5	日冕 EUV 波研究尚待解决的问题	27
第 2 章	ZEUS-2D 程序	31
2.1	基本求解方法	31
2.2	网格划分	32
2.3	具体数值算法	34
2.4	算法的稳定性和精确性	41
第 3 章	均匀大气中日冕 EUV 波的数值研究	43
3.1	摘要	43

3.2	研究背景介绍	43
3.3	物理模型及计算公式简介	44
3.4	计算结果	46
3.5	讨论和总结	57
<b>第 4 章</b>	<b>等温大气中日冕 EUV 波的数值研究</b>	<b>58</b>
4.1	摘要	58
4.2	研究背景介绍	58
4.3	计算涉及公式及背景场处理方法	61
4.4	计算结果	63
4.5	讨论和总结	74
<b>第 5 章</b>	<b>日冕 EUV 波多分量细节演化特征的数值研究</b>	<b>76</b>
5.1	摘要	76
5.2	研究背景介绍	76
5.3	物理模型及计算公式简介	77
5.4	计算结果	78
5.5	讨论和总结	87
<b>第 6 章</b>	<b>与日冕 EUV 波数值研究相关的一个 EUV 波观测事例分析</b>	<b>88</b>
6.1	摘要	88
6.2	研究背景介绍	88
6.3	观测和数据分析	89
6.4	结果	91
6.4.1	日冕 EUV 波概述	91
6.4.2	日冕 EUV 波与活动区环的相互作用	95
6.4.3	日冕 EUV 波通过活动区 11264 和一个暗条通道	95
6.4.4	日冕结构的反射波	96
6.4.5	一个极区冕洞的反射波激发的次级波	97
6.5	日冕 EUV 波的谱分析	98
	<b>参考文献</b>	<b>103</b>
	<b>编后记</b>	<b>115</b>
	<b>彩图</b>	

# 第 1 章 日冕 EUV 波研究概述

## 1.1 引 言

20 世纪 90 年代, 太阳和日光层观测 (the solar and heliospheric observatory, SOHO<sup>[1]</sup>) 卫星的极紫外成像望远镜 (the extreme ultraviolet imaging telescope, EIT<sup>[2]</sup>) 首次探测到在日冕中传播的大尺度波状扰动 (disturbance)<sup>[3]</sup>, 其传播范围几乎覆盖了整个可见的太阳表面。因为这种现象最初是由 EIT 观测到的, Thompson 等<sup>[4]</sup> 在研究 1997 年 4 月 7 日事件时, 将其称为 EIT 波。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>[56]</sup>)。这一现象被称为 EIT 波, 并不是因为只有 EIT 能看到, 而是作为一种纪念。现在大家普遍将这种在极紫外 (extreme ultraviolet, 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, 本书将 EUV 波和 EIT 波等同使用。

提到 EIT 波, 接下来必须要说到莫尔顿波。早在 20 世纪 60 年代, 人们就首次在太阳色球中观测到传播于太阳大气中的大尺度的波状扰动, 称之为莫尔顿波<sup>[87]</sup>。这种莫尔顿波表现为弧形的明亮前锋, 以速度大约  $1000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  的量级远离耀斑活动区传播。莫尔顿波是色球中的现象, 但其传播速度比色球中的阿尔文 (Alfvén) 波速度大很多。为了解决这个问题, Uchida 提出莫尔顿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文速度快很多<sup>[20]</sup>。这个模型成功地解释了莫尔顿波现象的特征和性质。实际上, 莫尔顿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 (magnetohydrodynamic, MHD) 激波向下扩张到色球引起的扰动。

EIT 波最初被认为是色球莫尔顿波的日冕对应物, 并且利用快模波模型可以成功地模拟一些波事件<sup>[22, 142]</sup>。但后来观测表明 EIT 波与莫尔顿波的特征很不一样。EIT 波表现出广泛的形态学特征<sup>[133]</sup>, 包括从锐利的莫尔顿波状前锋到弥漫且不规则的增亮。它们典型的传播速度为几百公里每秒, 比莫尔顿波的速度要慢得多。EIT 波的速度范围分布很广, 最慢的扰动只以几十公里每秒的速度传播<sup>[24]</sup>, 比

日冕中的声速和阿尔文波速都要慢。一些 EIT 波前沿似乎停在冕洞 (coronal hole) 边界 [25], 另外还有关于 EIT 波的波前转动的报道 [73]。

这些观测促使了一些 EUV 波模型的发展, 得出的结论也逐渐清楚, 但还没有确定的结论。目前有几种解释 EUV 波的模型: 快模波 (fast shock) 模型 [97, 142]、磁力线连续拉伸模型 [28, 29]、连续磁重联模型 [30, 31]、电流壳模型 [25, 32, 73]、慢模波 (slow shock) 或孤立子波模型 [24, 33]。解释 EUV 波的物理机制可分为: 波、非波、混合波。在上述的 5 种模型中, 快模波和慢模波或孤立子波模型支持波的机制; 支持非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。虽然 EUV 波地发现将近二十年了, 但这些扰动的物理本质仍处在争论中。要确定哪个模型最接近观测需要集聚更多波事件的更多信息, 并将这些信息与 MHD 数值模拟结合起来。

## 1.2 日冕 EUV 波的观测特征

### 1.2.1 日冕 EUV 波的形态

Thompson 等 [3] 第一次详细研究了日冕波现象, 他们利用 EIT 195 Å 的数据研究了几个与 CME 相关的特征, 包括爆发源区附近的暗区 (dimming), 爆发后环的形成和从源区准径向传播的亮波前 (图 1.1)。Thompson 等 [3] 所讨论的每一个现象都与同一个爆发相关, 不同特征的开始时间与由 SOHO/大角度光谱日冕仪 (large angle and spectrometric coronagraph experiment, LASCO) 图像推出的 CME 的开始时间一致。在后续的研究中, Thompson 等 [3] 提出日冕波可能是莫尔顿波的日冕表现, 他们发现这些波的振幅相对较弱 (在背景之上 14%~25%), 暗示日冕波可能在本质上不是激波。此外, 波前是弥散的没有表现出明显的激波边界。根据波速和传播特征, 他们得出结论称日冕波和莫尔顿波可能是相关的。

Wills-Davey 和 Thompson [35] 用过渡区和日冕探测器 (the transition region and coronal explorer, TRACE) [157] 171 Å 和 195 Å 波段的图像研究了一个日冕波。他们发现在 171 Å 波段可以看出磁结构的运动, 而在 195 Å 波段可以看出一个强的波前和暗区, 但难以分辨出磁结构运动。另外, 他们发现波的传播是不均匀的, 不同于 SOHO/EIT 经常观测到的近圆形波。Wills-Davey 和 Thompson [35] 给出波前加热的证据并通过比较 171 Å 和 195 Å 图像将波传播通过的等离子体的温度限制在 1~1.4 MK 内。根据波前的轨迹和速度变化, 他们认为波包含一个压缩分量。通过测量波

前截面上的密度变化, Wills-Davey<sup>[34]</sup> 给出该变化大体上是高斯型的, 表明该扰动是一个传播压缩波前。Veronig 等<sup>[36]</sup> 发现波振幅在 40 min 内减小的确切证据, 在最大振幅时刻, 波前的外边缘最陡 (图 1.2), 这些观测为日冕波的波理论提供了强有力的证据。

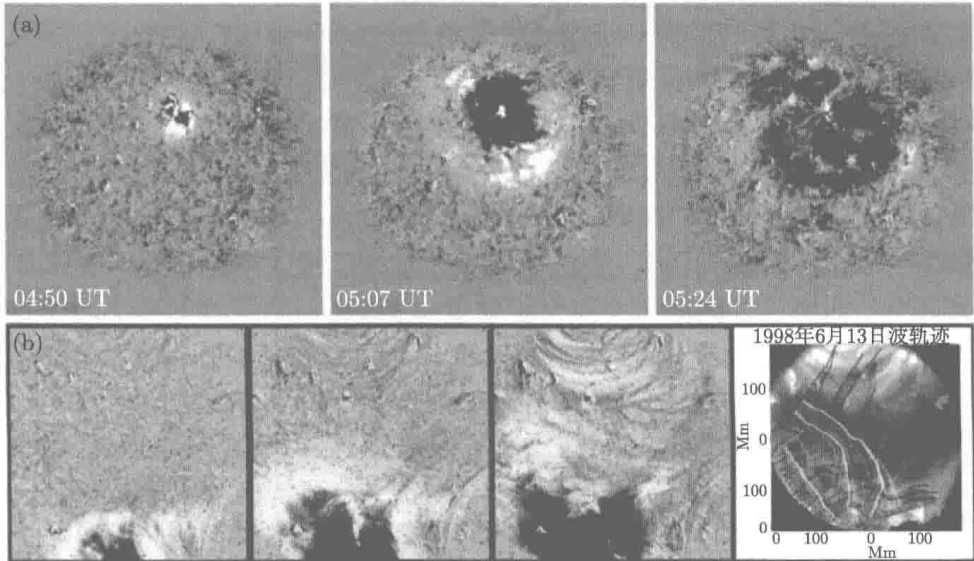


图 1.1 由不同仪器观测的两个日冕波的例子<sup>[24]</sup>

(a) SOHO/EIT 的运行相减像观测发生于 1997 年 5 月 12 日的一个日冕波, Thompson 等<sup>[3]</sup> 对其进行了详细研究; (b) TRACE 观测发生于 1998 年 6 月 13 日的事件, 图为固定相减像和测得的波前<sup>[34]</sup>

日冕波本质为波的证据被 Delannée 和 Aulanier<sup>[73]</sup> 及 Delannée<sup>[25]</sup> 质疑。Delannée 和 Aulanier<sup>[73]</sup> 发现亮波前可以在同一个位置持续几个小时, 这为真波理论的不可信性提供了强有力的证据。他们报道了与附近磁结构 (如跨赤道环和源活动区) 相关的许多暗区, 认为这些特征与磁拓扑密切相关。这些分析导致 Delannée<sup>[25]</sup> 得出结论称与太阳耀斑驱动的波传播相比, 日冕波现象与导致 CME 的磁演化更相关。Podladchikova 和 Berghmans<sup>[37]</sup> 用自动运算法则来探测和研究日冕波, 他们给出日冕波转动的证据, 这个结果被 Attrill 等<sup>[30]</sup> 所证实。Attrill 等<sup>[30]</sup> 研究了两种典型的日冕波, 发现在日冕波过程中存在两种暗区, 一种是耀斑附近的中心暗区, 另一种是伴随日冕波扩张的弥散暗区。他们还发现了这些日冕波的一个新特征, 那就是它们表现出双增亮: 中心暗区最外边缘的持续增亮和构成日冕波前沿的弥散增亮 (被扩展的弥散暗区所包围)。与 Delannée<sup>[25]</sup> 的想法一致, 他们猜测该观测与一个弥散日冕波是 CME 磁足点的观点一致。有趣的是, Thompson 等<sup>[97]</sup> 指出 MHD 波和磁场线打开两种理论均能解释 1997 年 9 月 24 日观测的许多特征。

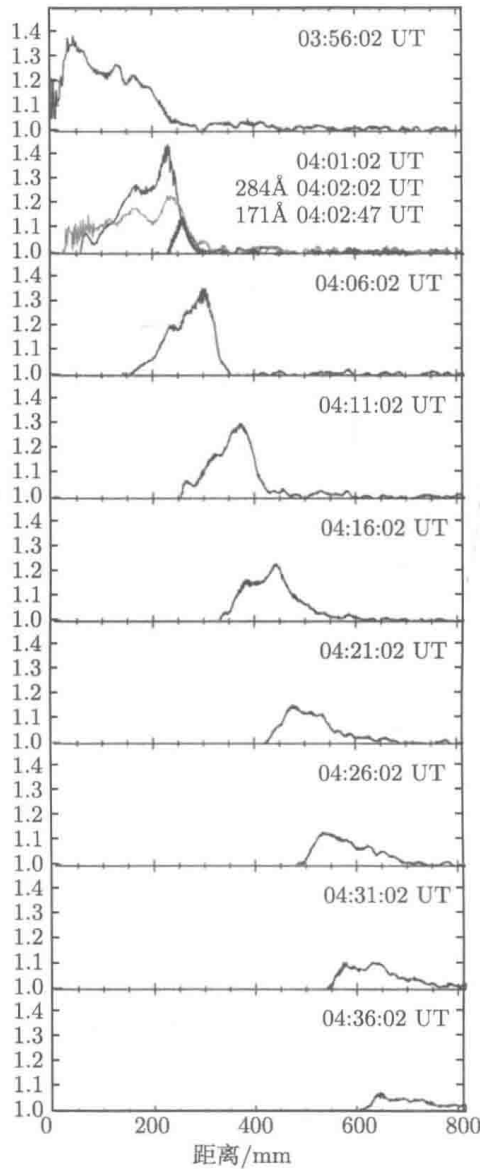


图 1.2 STEREO/EUVI 195 Å 波段观测的日冕波的脉冲强度轮廓

轮廓产生于运行相比像上  $60^\circ$  宽的扇区沿纬向的求和。图像的时间分辨率为 10 min。波发生后，脉冲最初随着振幅的增加而变陡。之后，随着波远离源区，人们可以看到振幅在减小，波轮廓加宽，尽管脉冲轮廓的积分面积随着时间的变化仍为常数 [36]

### 1.2.2 日冕 EUV 波的运动学特征

早期的观测报道日冕波有每秒几百公里的恒定速度 [3]。最初，日冕波的速度被发现超过估算的日冕声速，稍低于阿尔文波的速度。Thompson 和 Myers [38] 报道日冕波的速度范围很大，为  $50\sim 700 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，尽管他们认为日冕波的典型速度范

围为  $200\sim 400\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，这与 Klassen 等 [133] 报道的日冕波的典型速度 ( $170\sim 350\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 相当。Wills-Davey 和 Thompson [35] 在损失视场的情况下用较高时间分辨率的 TRACE 图像 (约 1 min) 确定了一些日冕波 (只是日冕波的一部分) 的速度, 得到的速度是  $200\sim 800\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。日冕波观测速度的上限大于阿尔文速度使 Wills-Davey 等 [39] 认为快模 MHD 波理论符合这些观测数据。

利用 STEREO/EUVI 图像的三维重构, 人们研究了日冕波运动的常速度模型 [41, 59]。Kienreich 等 [59] 发现日冕波在全球范围可见太阳大气中以常速度传播, 速度为  $263\pm 16\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。他们将波的动力学与相关 CME 的早期阶段相比较得出结论称波由 CME 的侧向膨胀触发之后以接近宁静太阳日冕内的快模 MHD 波速自由传播。Patsourakos 和 Vourlidis [42] 分析了同一个事件, 发现波的运动学可以由一个加速度为  $-25\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  的二次曲线很好地拟合。Veronig 等 [36] 进一步给出了日冕波常速度阐述的证据。通过分析边缘观测的一个穹顶状日冕波, 他们发现日冕波的侧向膨胀速度约为  $280\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外, 他们给出波穹顶以更快的速度 (约为  $650\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 向上膨胀 (相对日面)。

许多作者发现常速度假设实际上与观测的日冕波的运动学不一致 [43-46]。Warmuth 等 [43] 用 EIT 195 Å 波段观测了两个事件 (以  $\text{H}\alpha$  作为补充), 发现了一个非线性的速度轮廓, 表示在观测的前 2000 s 内日冕波表现出非零加速。图 1.3 给出在 EIT 195 Å 和  $\text{H}\alpha$  波段很好地被观测到的一个日冕波的距离随时间的演化 [43], 细线和粗线分别给出了距离-时间数据的二次和幂率拟合, 图中右下角的小图给出了由此产生的速度随时间的演化。该图明确表明距离-时间和速度-时间的演化均可以用常加速模型来很好地拟合, 这导致 Warmuth 等 [43] 得出结论称日冕波和莫尔顿波是同种传播波前的信号。在一篇后续的文章中, Warmuth 等 [47] 用不同波段的数据 (EUV、He I 10830 Å、软 X 射线 (soft X-ray, SXR) 和射电数据) 研究了 12 个与耀斑相关的波事件, 发现不同波段的波有相似的运动学曲线, 这意味着它们是相同的物理扰动。另外, 他们发现在所有研究的事件中, 波在所有波段上均有减速, 这可以被用来解释莫尔顿波和日冕波视速度的不同。同时, 他们得出结论称这些观测可以用自由传播的大振幅单峰 MHD 激波来解释。类似地, Vršnak 等发现日冕波在 He I (10830 Å) 和  $\text{H}\alpha$  的色球图像上减速的证据, 它们的减速度在  $100\sim 1000\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  的量级, 这种减速在 SOHO/EIT (195 Å) 波段的图像上也被观测到。

Long 等 [46] 用 STEREO/EUVI 时间分辨率为  $2.5\sim 10\text{ min}$  的数据研究了发生于 2007 年 5 月 19 日的一个日冕波的不恒定速度。他们发现由一个脉冲产生的日冕波在四个波段 (304 Å、171 Å、195 Å 和 284 Å) 有相似的运动学特征, 但每一个波段的运动学都与常加速度的假设不一致。在 304 Å 波段, 他们发现日冕波在它发生的 28 min 内表现出一个速度峰值 ( $238\pm 20\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 加速度从  $76\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  变化到



$-102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。在  $195 \text{ \AA}$  波段也观测到类似的速度和加速度，但在时间分辨率较低的  $284 \text{ \AA}$  波段速度和加速度的值比较低。在较高时间分辨率的  $171 \text{ \AA}$  波段，速度变化很大，在波产生的  $20 \text{ min}$  内速度的峰值为  $475 \pm 47 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，加速度从  $816 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  变化到  $-413 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。 $171 \text{ \AA}$  波段较高的时间分辨率 ( $2.5 \text{ min}$  相对于响应温度类似的  $195 \text{ \AA}$  波段的  $10 \text{ min}$ ) 被发现对波的速度和加速度有重要的影响，速度和加速度分别增加了 2 倍和 10 倍，这些结果表明先前测量的日冕波的速度可能是个下限。值得注意的是， $171 \text{ \AA}$  波段的日冕波从接近静止到快速运动的过程导致波发生不久速度就明显地快速上升。另外，利用  $304 \text{ \AA}$ 、 $195 \text{ \AA}$  和  $284 \text{ \AA}$  波段有限的的数据点得到的日冕波的速度和加速度存在很大的不确定性。但如果用数值差分方法 (根据拉格朗日多项式展开) 来得到这些波段的速度和加速度，又可能加强了数据点上最初微不足道的趋势。Veronig 等 [45] 也分析了 STEREO 观测的 2007 年 5 月 19 日的事件，证明了日冕波在减速。他们建立了距离-时间切片，对该切片进行线性拟合得出平均波速为  $260 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，与 Long 等 [46] 的结果相当；对该切片进行二次拟合产生了一个  $460 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  的初速度和一个  $-160 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  的常减速度。速度演化表明波减速，波在早期的速度高达  $400 \sim 500 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，比 Klassen 等 [133] 报道的典型速度 ( $170 \sim 350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 稍快，这是因为 Veronig 等 [45] 和 Long [46] 等都采用了更高时间分辨率的 STEREO/EUVI 的数据。

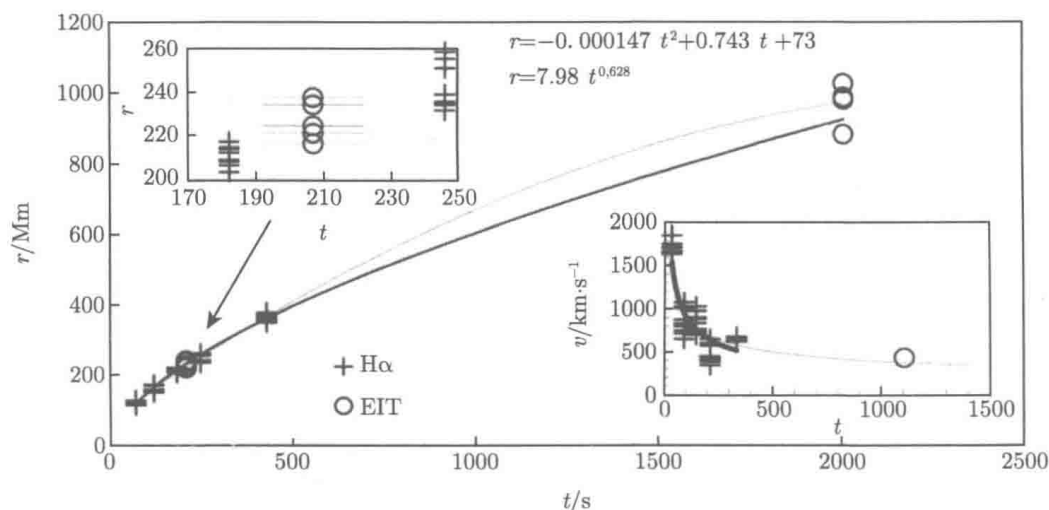


图 1.3 一个日冕波和莫尔顿波的传播 [43]

在曲线左上的小图中，一个放大的图像给出  $\text{H}\alpha$  波前和 EIT 日冕波前的关系；粗线和细线分别给出幂率和二次拟合；曲线右下的小图给出  $\text{H}\alpha$  (十字) 和 EIT (圆圈) 速度随时间的变化

人们也曾报道过更复杂的日冕波运动学，如静止波前，这很难与波模型一致。例如，Zhukov 等 [48] 报道了一个几乎对称的波前表现出一个奇怪的速度轮廓，这个速度轮廓是采用两种独立的方法得到的。波在一个很短的时间内以  $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$



的速度传播,然后在大约 30 min 内以一个很低的速度 ( $20\sim 40\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 运动,最后再重新加速到大约  $200\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这样的观测结果使人们很难理解一个自由传播的日冕波是如何造成这样的速度变化的。但是,Zhukov 等 [48] 表示这可能是爆发暗条的行为。爆发暗条曾被观测到表现出间断的运动学演化 [49]。静止波前也曾在冕洞边界被观测到 [50]。

### 1.2.3 日冕 EUV 波的多波段观测

EUV 波的第一次多波段观测是由 EUVI 完成的,EUVI 在 EUV 的四个不同波段 ( $171\text{ \AA}$ 、 $195\text{ \AA}$ 、 $284\text{ \AA}$ 和  $304\text{ \AA}$ ) 分别观测同一个 EUV 波 [45, 46, 52], 时间分辨率为  $2.5\sim 20\text{ min}$ , 得到的主要结果是 EUV 波在  $195\text{ \AA}$ 波段的观测最好, $195\text{ \AA}$ 波段的峰值响应温度是  $1.5\text{ MK}$ 。EUV 波在其他波段的观测都比较弱。

AIA 进一步研究了 EUV 波的多波段观测,它可以提供七个波段 ( $94\text{ \AA}$ 、 $131\text{ \AA}$ 、 $171\text{ \AA}$ 、 $193\text{ \AA}$ 、 $211\text{ \AA}$ 、 $335\text{ \AA}$ 和  $304\text{ \AA}$ ) $12\text{ s}$  时间分辨率的观测。AIA 的观测表明 EUV 波在  $193\text{ \AA}$ 、 $211\text{ \AA}$ 和  $335\text{ \AA}$ 波段的观测最好,这几个波段的温度范围是  $1.0\sim 2.5\text{ MK}$ (图 1.4)。另外, EUV 波在  $171\text{ \AA}$ 波段(冷日冕波段)有时表现为强度减弱,即暗波前。 $171\text{ \AA}$ 波段的暗波前和  $304\text{ \AA}$ 波段弱的亮波前表明波信号来自日冕(即线心为  $303.32\text{ \AA}$ 的  $\text{Si XI}$ 线),而不是过渡区(即  $\text{He II}$ 线),这被 Patsourakos 等 [52] 和 Long [51] 等讨论过。

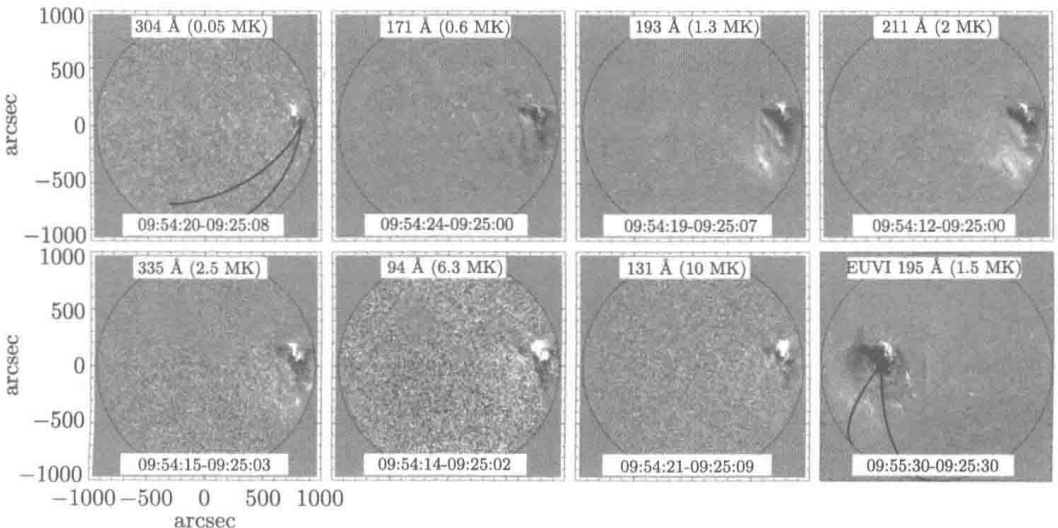


图 1.4 AIA 在七个 EUV 波段观测的发生于 2010 年 8 月 4 日的一个 EUV 波 (arcsec 为角秒)[51]

Schrijver 等 [53] 采用 AIA 的温度响应方程模拟了 2011 年 2 月 15 日的一个 EUV 波的强度变化,他们假设观测的强度变化只由于绝热压缩。他们发现 AIA 的观测与温和 (mild) 等离子体加热和压缩一致,是一种等离子体加热 (warming) 类