

文章编号: 1000-8349(2009)01-0001-13



太阳过渡区的结构与特性

田 晖^{1,3}, 谭 博¹, 夏利东², 何建森¹, 周桂清¹

(1. 北京大学 地球与空间科学学院空间物理与应用技术研究所, 北京 100871;

2. 山东大学威海分校 空间科学与物理学院, 威海 264209; 3. 马普协会太阳系研究所, 德国)

摘要: 太阳过渡区是位于色球与日冕之间的一个高度动态的等离子体区域。通过对太阳紫外光谱的研究发现, 过渡区的主要结构是以磁场集中为特征的网络组织。首先回顾太阳过渡区的研究历史, 接着从整体上介绍太阳过渡区的结构及观测特征, 然后介绍过渡区各种结构和现象的主要模型和物理解释, 并结合作者的认识进行必要的评论, 最后对未来的研究方向提出看法。

关键词: 太阳物理学; 太阳过渡区; 紫外辐射

中图分类号: P182 **文献标识码:** A

1 引 言

太阳过渡区位于色球到日冕之间, 传统观点认为它是太阳大气里温度在 $2.5 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ K 之间的薄层。在光球、色球和日冕, 温度和密度的变化都相对比较平缓。然而在过渡区, 温度和密度则分别陡增和陡降大约两个数量级, 表现出极强的不连续性。太阳过渡区也因此得名^[27]。

经过数十年的研究, 人们已经认识到太阳大气远非静态的分层结构所能描述, 对宁静太阳大气磁场结构的研究和紫外光谱的观测表明, 太阳过渡区并不是一个简单的热平衡分层结构, 而是一个磁场和等离子体结构非常不均匀的区域^[71]。近年来, 高空间、时间和光谱分辨率的观测更是表明, 太阳过渡区是一个瞬变的高度动态的等离子体区域^[1]。

由于过渡区位于太阳低层大气与高层大气之间, 加热日冕和驱动太阳风的能量大多都会由下而上经由这个区域, 因此对太阳过渡区的研究是解决太阳物理领域两个重要课题——日冕加热和太阳风起源的关键。

本文的第 2 章将介绍太阳过渡区的研究历史; 第 3 章从整体上介绍太阳过渡区的结构及

收稿日期: 2008-03-17; **修回日期:** 2008-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40336053, 40874090, 40574064)

观测特征;第4章介绍过渡区各种结构和现象的主要模型和物理解释,并结合本文作者的认识进行必要的评论;第5章对未来的研究方向提出了需要加强的几个方面。

2 过渡区的研究历史

太阳的紫外光谱学诊断技术是人们了解过渡区最主要的工具。人们对过渡区特性的认识是与通过发射火箭和飞船研究太阳紫外光谱的能力齐头并进的。作为恒星的太阳具有5 770 K的有效表面温度。黑体辐射温度峰值对应于大约5 000 Å的波长。因此强大的连续谱控制了来自太阳的可见光辐射。然而,在紫外的1 000 Å处连续谱辐射减少了大约 10^5 倍。这意味着用紫外波段可以观测到强度与日食时观测的日冕可见光辐射相比拟的发射线,并且可以正对着日面观测。而在过渡区温度下,丰富的离子共振线正是处在光谱的远紫外和极紫外波段(一般定义100~1200 Å为极紫外(EUV)波段,1200~2 000 Å为远紫外(FUV)波段),因此利用观测数据分析太阳的紫外光谱,太阳物理学家可以对过渡区的结构和物理性质进行深入了解。

1946年,美国的海军研究实验室(NRL)运用V2火箭首次获得了太阳的紫外光谱图。到了20世纪60年代早期,人们已经可以获得极好的完成标定的全日面紫外光谱。对这些紫外光谱的量化分析开始为认识色球顶部、过渡区和日冕提供重要线索。

随后,在20世纪七八十年代,全新的紫外和远紫外光谱仪被放到卫星和火箭中,对太阳大气进行更加深入细致的观测。在这一时期,由NRL研制的、搭载在Skylab空间站上的S082-B极紫外光谱仪^[3]观测到过渡区是由不均匀的精细结构组成的,过渡区的辐射随时间发生快速的变化。随后,NRL研制的高分辨率光谱望远镜HRTS^[4-6]被多次搭载于火箭上和Spacelab2飞船上,发现了过渡区爆发事件(Explosive events)的存在。然而,这些观测都只是孤立的例子。在那个时期,对于过渡区的整体状态的认识仍然是有限的^[1]。

作为高度动态等离子体的过渡区的整体图像是来自于SOHO(Solar and Heliospheric Observatory)飞船的观测。SOHO飞船上搭载的两个紫外光谱仪对过渡区的研究起到了很大的推动作用,它们是日冕诊断光谱仪CDS(Coronal Diagnostic Spectrometer)^[7]和太阳紫外辐射测量仪SUMER(Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation)^[8,9]。利用这两个仪器12年来的观测数据,人们对太阳过渡区有了更加全面深入的了解。SUMER可以提供FUV/EUV波段高空间(1'')、时间(1 s)和光谱分辨率(第一衍射级0.044 Å/pixel,第二衍射级0.022 Å/pixel)的特定的太阳区域的谱线轮廓图;还可用选定的谱线(形成温度从 10^4 K到 2×10^3 K)获得整个日面和内日冕的图像。SUMER测量多普勒频移的精度达到1~2 km/s。SUMER的观测可以对太阳上许多结构进行等离子体密度、温度和丰度的光谱学诊断,从而支持对发生在色球顶部、过渡区、日冕底部的基本的物理过程的研究。至今已有上千条SUMER谱线被识别^[10],其中的一部分已被频繁用于过渡区的研究。

CDS可以观测太阳大气中极紫外波段谱线,可观测谱线波长范围为150~800 Å。通过对特定谱线强度与轮廓的观测,可以得到太阳大气中离子的温度、密度、流动等信息。有几个角秒的空间分辨率与几秒的时间分辨率,可以研究日冕和过渡区的精细结构。由于CDS观测的谱线温度范围也比较宽,可以通过同时对多条谱线进行观测,研究较宽温度范围的离子特征。

后来 TRACE (Transition Region and Coronal Explorer) 卫星进一步获得了丰富的紫外波段的图像, 证明了过渡区和日冕具有强烈的随时间的变化和极其精细的结构。TRACE 的视场为 $8.5' \times 8.5'$, 相当于日面的十分之一, 可以提供紫外波段高空间分辨率 (可达 $0.5''/\text{pixel}$) 和高时间分辨率 (可达 1 s) 的图像。仪器有 4 个通道, 分别对应极紫外波段的 171, 195, 284 Å, 和紫外波段 1 200~1 700 Å^[11]。因此, TRACE 可以提供太阳表面 $6.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^7$ K 温度范围太阳大气局部范围的图像。通过补偿太阳自转效应, TRACE 仪器可以全程追踪太阳表面局部区域内很多动态现象与结构的发展过程, 如耀斑爆发、日冕亮点的产生与演化、网络组织、针状体形态随时间的快速变化等。

3 过渡区的结构及观测特征

3.1 过渡区的网络结构

在对太阳大气的传统观点中, 过渡区将色球顶部与日冕分隔开。在这层区域, 太阳大气的物理特性发生了重大的变化。从图 1 可见, 光球、色球和日冕的温度和密度变化相对比较平缓, 而过渡区却表现出近乎不连续性, 温度在短短几十公里的范围内便从 25 000 K 飙升到 10^6 K, 密度则从 10^{10}cm^{-3} 陡降至 10^8cm^{-3} 。随着温度上升, 大气辐射光谱的主体由中性的氢、氦辐射变成了丰度较低而原子序数较高的高度电离的离子辐射。原先由于光球密度较大, 磁场受到光球气体控制, 而在较稀薄的过渡区, 磁场却反过来控制气体的运动, 从而影响大气结构。最后, 如热传导等这些在光球和色球底部对决定大气的温度和密度结构不重要的物理过程也变得重要了^[27]。

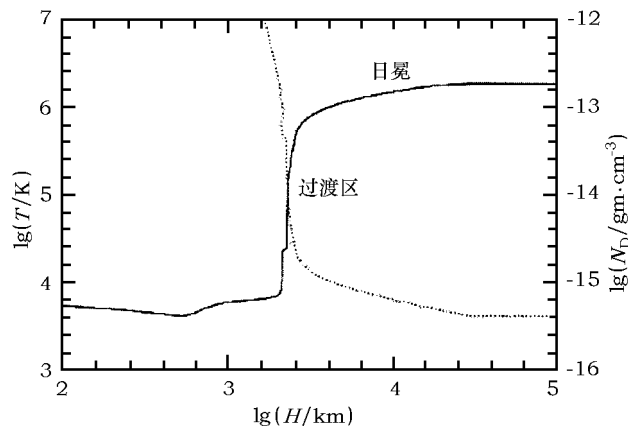


图 1 宁静太阳大气的温度 - 密度随高度的变化

实线和虚线分别表示温度和密度^[27]

过渡区的结构呈现出类似于色球的网络组织^[12], 表现为过渡区谱线辐射强度图像中的增亮结构。这些过渡区网络组织遍布全日面, 被认为是光球超米粒组织边界向上延伸的结果。因此网络组织也对应着光球磁场的集中处。网络组织的尺寸在色球与日冕之间的过渡区急剧增大^[13,76], 表明过渡区是太阳磁场结构迅速扩展的区域。用网络组织的磁通量被全部移位所

需的时间来定义网络组织的寿命。网络组织的寿命大概在 20~50 h^[14,15]。过渡区谱线的辐射图中暗的部分被称为网络内区,其大小在 $2.0 \times 10^7 \sim 3.0 \times 10^7$ m 之间^[16]。图 2 显示了网络组织在过渡区底部 (Si II)、中部 (C IV) 和顶部 (Ne VIII) 的不同形态,可以看到网络组织从过渡区底部到顶部不断扩展的趋势。图 2 还显示了强磁场与过渡区谱线辐射增强的部分 (对应网络组织) 在位置上的对应关系,可以发现两者吻合得非常好^[69]。

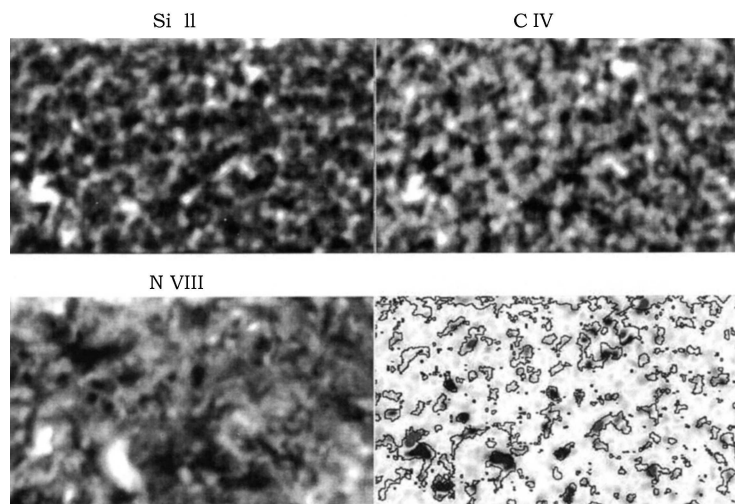


图 2 分别形成于过渡区底部、中部、顶部的典型谱线 Si II、C IV、Ne VIII 的辐射强度图,以及纵向磁场强度图与 Si II 强度等值线^[69]

在对太阳的临边观测中,极紫外谱线在日面外辐射强度最大处与日面边缘的距离可以认为是该谱线主要辐射源所在的高度。临边观测发现,一些不同形成温度的过渡区谱线的辐射源可以位于大约相同的高度上^[27]。在日面观测中,单独的极紫外观测无法确定谱线辐射高度。通过对谱线强度与不同高度上的外推磁场进行相关分析,可以得到相关系数随高度的变化曲线,最大相关系数对应的高度可以近似认为是过渡区谱线的辐射高度^[69]。用这种方法可以得到多条过渡区谱线在同一日面区域的辐射高度。最近的研究结果表明,形成温度不同的谱线其辐射高度可以近似相同,从而进一步证实了不同温度的等离子体可以共存于过渡区中的同一高度^[71,72,77]。值得注意的是,无力场外推只适用于没有垂直电流的情况。对于有强剪切的磁场位形,如磁重联的磁场位形,无力场外推无法很好重构实际的磁场位形。

3.2 过渡区的红移和蓝移现象

早在 1976 年, Doschek 等人^[17] 就通过 Skylab 上的 S082B 仪器发现,形成于过渡区的谱线具有明显的红移特征,红移速度可达 15 km/s。随后, HRTS(High Resolution Telescope and Spectrograph) 的观测进一步证实了这一结果。Dere 等人^[59] 发现,形成于过渡区中部的谱线 C IV (1 548 Å 和 1 550 Å) 在冕洞和宁静区分别存在平均 2 km/s 和 10 km/s 的红移。他们还发现,存在蓝移的地方在冕洞中所占的比例比在宁静区中要大,在冕洞里有 26% 的地方是蓝移,然而在宁静区,只有 7% 的地方是蓝移^[59]。活动区的红移平均大约是宁静区的两倍。最近的研究发现,分别形成于过渡区中部和顶部的谱线 O IV 和 Ne VIII 在活动区磁环的根部都存在高达 30 km/s 的红移^[30,72]。

进入 SOHO 时代, 人们已经确认, 形成于过渡区中非常宽的温度范围内的谱线均存在明显且稳定持久的红移。这说明过渡区具有系统性的流动。Peter^[57,58] 和 Xia 等人^[81-84] 详细研究了过渡区谱线的平均多普勒频移随谱线形成温度的变化特征, 发现在宁静区, 形成于色球和低过渡区的谱线红移平均为 2~5 km/s; 随着温度的增加, 红移越来越显著, 在 2×10^5 K 左右达到最大 (平均可达 10 km/s); 温度再增加, 红移的值开始逐渐降低, 在 5×10^5 K 之后, 红移变为蓝移, 形成于高过渡区和低日冕的谱线 Ne VIII 和 Mg X 就显示出蓝移的特征^[58,81]。

高过渡区谱线 Ne VIII 形成于网络磁场由色球向日冕迅速扩展的过渡区顶部, 处于过渡区谱线由红移逐渐变为蓝移的关键区域, 近年来在太阳风起源的研究中占有非常重要的位置。人们发现在冕洞中, Ne VIII 这条谱线显示出大片的蓝移^[2,57,60,61,77], 并且辐射强度越暗蓝移越大^[82]。Hassler 等人^[2] 通过比较 Ne VIII 多普勒图上大片蓝移与色球网络组织的图像, 发现大的 Ne VIII 蓝移都集中在网络组织的边界上, 从而首次通过直接观测揭示了太阳风起源于网络组织的边界。Tu 等人^[68,70] 则进一步发现 Ne VIII 的大块蓝移区域与通过磁场外推技术重构出来的磁漏斗位置相吻合, 从而揭示了太阳风起源于磁漏斗结构。

3.3 过渡区的瞬变事件

过渡区在本质上是动态的, 观测发现过渡区中存在大量瞬变现象。其中最重要的五类是: 闪烁物 (Blinkers)、爆发事件 (Explosive Events)、微 / 纳耀斑 (Micro/Nano Flares)、日冕亮点 (Coronal Bright Points)、针状体 (Spicules)。

闪烁物最先是由 SOHO/CDS 探测到的过渡区谱线 (尤其在 O IV 554 Å 和 O V 630 Å) 强度显著增亮现象^[41,49]。其典型的尺寸为 $8'' \times 8''$, 寿命为 3~110 min, 常分布在网络组织里, 平均强度为网络组织强度的 1.8 倍, 多普勒速度为 -10~25 km/s 并以红移为主, 闪烁物多与较强的单极磁场相联系^[42]。

爆发事件以带有双向等离子体喷射为特征, 因此又被称为双向急流 (bi-directional jets)。与其相联系的多普勒速度高达 50~200 km/s, 与局地阿尔芬速度可比拟^[39]。爆发事件最早是由 HRTS 仪器发现的, 其尺寸约为 $2'' \sim 5''$, 平均寿命约为 60 s^[5]。研究表明, 爆发事件一般不发生在较强磁场处, 而倾向于发生在弱的混合磁场极性的区域^[18]。爆发事件在日冕和太阳风的质量平衡中可能起到重要作用, 但是对太阳大气的加热并不显著也并不直接。

微 / 纳耀斑可认为是耀斑的微缩版, 也经常被过渡区谱线所观测到。微 / 纳耀斑不仅存在于过渡区, 也存在于日冕中。微 / 纳耀斑的能量要远小于一般耀斑, 但是发生的频率却远高于一般耀斑^[52,54]。目前, 学术界有一种流行的观点: 遍布全球的各种尺度的微 / 纳耀斑就是日冕加热的关键因素^[52]。但是由于微 / 纳耀斑的尺度小, 目前的观测仍无法完整地分辨出其具体的结构和演化过程。因此, 研究微 / 纳耀斑在日冕加热过程中的作用还有待于观测精度的进一步提高。

日冕亮点是小尺度 ($30'' \sim 40''$) 的发生在 X 射线和极紫外波段的局地增亮现象, 其寿命在 5~40 h^[20], 主要发生在高过渡区和低日冕^[80]。亮点的辐射是高度动态的, 有时会呈现出周期为 7~64 min 的振荡特征^[79,88,89]。TRACE、SUMER、CDS 等仪器高空间和时间分辨率的观测表明, 亮点的演化与双极磁场的相互作用 (如双极磁流浮现、磁对消) 紧密相关^[21,22]。统计研究表明, 三分之一的日冕亮点由新浮现的磁通量所产生, 而三分之二的 X 射线亮点与

磁场相消有关。亮点的多普勒频移在过渡区底部、顶部和低日冕区比较小,而在过渡区中部最强,红移和蓝移均可超过 10 km/s [78]。从形成于过渡区顶部的谱线 Ne VIII 看,亮点处对应红移或者很小的蓝移,对太阳风的贡献被认为可以忽略 [82]。研究发现在日冕亮点在冕洞和宁静区中的表现相似,并无不同 [64]。

另一种瞬变现象是在日面边缘比较容易观测到的针状体。针状体携带的物质和能量对色球、过渡区和日冕的能量和质量平衡很重要,因为针状体的形成和消失过程被认为是物质和能量在色球和日冕之间运输的过程。针状体是从色球延伸到日冕的一种射流状的结构,占据日面 $1\% \sim 2\%$ 的面积,在高纬比在低纬多。射流速度在 25 km/s 左右,其长度为 $5\,000 \sim 15\,000 \text{ km}$,宽几百到 $2\,000 \text{ km}$,寿命 $1 \sim 10 \text{ min}$ 。针状体下端在光球之上一两千公里(色球顶部)。针状体物质到达其顶部后,要么向色球回落,要么在过渡区消失 [81]。针状体最早是利用 $H\alpha$ 谱线在日面边缘观测到的,在 UV/EUV 波段的过渡区谱线也可以普遍地观测到。日面 $H\alpha$ 观测和 SUMER 及 TRACE 的极紫外临边观测都发现,针状体中有时存在周期约为 5 min 的振荡 [48,84,85],说明针状体的产生可能与光球的 P 模振荡有关。在极区,还间或可以观测到伸展得更长的巨型针状体。巨型针状体这个名词最初是用来称呼在紫外波段观测的针状体,以与用 $H\alpha$ 观测的针状体相区别。现在一般将较大较复杂的针状体结构称为巨型针状体,可以在 EUV 谱线观测到,也可以在 $H\alpha$ 谱线观测到。巨型针状体可能是由几个比较长(一般超过 $30\,000 \text{ km}$)的针状体组成的 [84]。

4 过渡区的理论模型

4.1 过渡区的网络结构模型

在过渡区,磁场控制着等离子体的运动。因此,磁场的位形也就决定了过渡区的结构。Gabriel [24] 提出了第一个过渡区网络结构的模型。在这个模型中,光球超米粒的对流运动将所有磁场局限在超米粒组织的边界上,而所有磁场开放地向上延伸。过渡区的辐射全部来源于从色球和过渡区网络中向上延伸的磁漏斗结构。该模型假设热传导沿磁力线往下运输进入网络。在网络中心,传导流量随高度而变,在 $2 \times 10^5 \text{ K}$ 对应的高度以下迅速减小。这个模型计算的过渡区辐射,在 10^5 K 以上与观测比较吻合,但是在 10^5 K 以下与观测不符 [25]。但无论如何,该模型是人们从理论上解释过渡区结构所迈出的第一步。

十多年后, Dowdy 等人 [26] 注意到观测的光球磁场网络(位于超米粒组织边界)中存在很多具有两极特性的精细磁场结构,这导致他们提出了一个全新的过渡区结构图像。在这个结构中,网络磁场只有一部分是开放地伸向日冕的,这部分被称为热的过渡区,其温度由日冕的热传导来维持。另一部分网络内的磁场则是低矮的尺度不超过 10 Mm 的小磁环,这些小磁环尺度和温度各异,它们是冷的过渡区的主要组成部分。由于这些磁力线圈与日冕是隔热的,因此其中的气体不会是由日冕传导的能量来加热的,而是内部加热的。这一模型克服了 Gabriel 模型的缺点,但是却要求小磁环必须有内在的加热源。这一结构图像得到了观测上的证明,如 Xia 等人 [83] 利用 SUMER 的高分辨率观测,发现形似磁环的辐射结构是过渡区辐射的主要特征,他们还发现尺度在 $2'' \sim 10''$ 的结构在网络中随着谱线形成温度的增加而增大,证明

网络磁场结构在随高度扩展。

最近, 根据 SUMER 的观测, Peter^[29] 提出了一个新的过渡区结构模型 (见图 3)。该结构包含宁静太阳大气的整体结构, 主要强调太阳过渡区。根据这个结构, 从色球中部到几 Mm 高度, 所有网络中的磁场结构是一样的, 日冕漏斗的根部和小磁力线圈尺度相当, 发生的物理过程相同; 在网络内区, 向上传播的激波占主导。往上到 5 Mm 左右, 日冕漏斗开始扩张, 但仍与网络里的小磁力线圈共存。到 10 Mm 左右, 日冕漏斗占据了整个日冕的范围, 所有日冕漏斗看起来都差不多, 加热机制也类似。与太阳风相联系的漏斗里的加热为太阳风提供能量; 而大磁力线圈两个足部的不对称加热导致物质流动。在大磁力线圈之上, 不同区域的开放的漏斗扩张并融合在一起, 到几个太阳半径处变得均匀。该结构最主要的特点是, 漏斗状磁结构既可能是太阳风起源的区域, 也可能只是大尺度磁环的根部。这个观点也得到了多数人的接受。

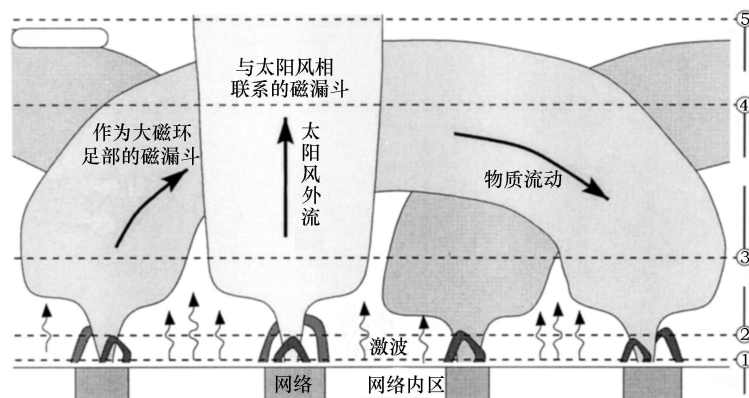


图 3 过渡区结构^[29]

除此之外, 还有一些专家认为目前的观测仪器尚未观测到过渡区的基本结构单元。他们将这种结构单元命名为未分辨的精细结构 (UFS, unresolved fine structures)^[31-34], UFS 与色球和日冕不连接。他们认为只有进一步提高探测仪器的时间和空间分辨率, 才能观测出这种基本结构单元。这一猜想也并非没有道理, 因为伴随着每次探测仪器分辨率的提高, 总会发现一些新的结构和现象。因此谁也没法肯定现在所能达到的分辨率就能分辨出过渡区的最基本结构。

4.2 过渡区红移和蓝移现象的物理解释

光谱仪观测到的多普勒频移反映了物质的流动。对于形成于过渡区中部的谱线普遍存在的红移现象, 以及过渡区顶部发现的蓝移现象, 有多种模型对其进行解释。常见的机制有如下几种:

(1) 以针状体的形式射向日冕的等离子体流在冷却后又往下流向过渡区, 造成过渡区谱线普遍出现红移^[35]。由于针状体物质是冷的, 因此无法被形成于过渡区顶部的温度较高的谱线观测到。Cheng^[36] 提出的针状体激波模型有力地支持了这个观点。在这个模型中, 光球能量的脉冲式释放产生激波, 在向上传播的过程中抬升并加热了过渡区和色球等离子体, 激波反射后造成物质往下流, 造成过渡区谱线的红移。而越来越多的观测证据表明, 针状体在日面上

是广泛分布的,这也为这一理论提供了初步的观测基础。

(2) 磁环两个足部不对称加热导致虹吸现象^[28,38,43],这些模型通过在磁环两个足部施加严重不对称的热量输入来产生沿磁环的系统性物质流动。Mariska^[28]建立的模型可以计算磁环中谱线的辐射和多普勒频移。其结果显示,过渡区谱线 C IV 和 O IV 的红移分别可以达到 8 km/s 和 5 km/s,与观测相符;但是同样形成于过渡区中部的谱线 O V 却产生了 18 km/s 的蓝移,这与观测是相悖的。因此,这一模型与观测的精确对应还有距离。

(3) 磁圈顶部纳耀斑释放的部分能量产生波动,波动沿磁圈向下传播^[37]。在 Hansteen^[37]的模型中,磁环顶部发生纳耀斑,导致波动向下传播,通过过渡区产生红移。红移一部分是由波动序列中的粒子运动与谱线辐射变化之间的耦合作用产生的,另一部分与波压引发的过渡区临时性运动有关。然而该模型所能得到的红移大小远小于观测值。在随后的一次研究中,Hansteen 等人^[56]仍然考虑向下传播并在色球反射的磁流体波,这次他们得到过渡区中部的谱线 C IV 可以产生 7.5 km/s 的红移,这与观测吻合^[58,81];而过渡区顶部的谱线 Mg IX 则产生 15 km/s 的蓝移,远大于这条谱线在观测中被发现的蓝移值。

(4) 发生在网络组织处的磁场重联可以在过渡区中部产生红移,在过渡区顶部产生蓝移。Tu 等人^[68,70]认为,过渡区顶部正是磁漏斗结构迅速向日冕扩展的区域,也是开放磁力线与网络中低矮的小磁环接触面积最大的地方,因而当条件合适时,很容易产生磁场重联,从而导致沿漏斗向上的流动,以及相应的向下的物质流动。前者导致过渡区顶部谱线的蓝移^[2,65],对应太阳风物质的初始流动;后者则导致过渡区中部出现普遍的物质下行,从而产生红移。He 等人^[74]通过一维数值模拟,从理论上证实了该机制可以产生与观测相符合的红移与蓝移。然而形成于过渡区顶部的谱线所显示出来的蓝移并不一定与太阳风起源相联系,最近,He 等人^[73]和 Tian 等人^[75]通过分析极紫外的辐射和多普勒频移,并结合磁场外推技术,发现在宁静区,过渡区顶部的蓝移更可能是向磁环供应物质的信息。此种解释还有待数值模拟来验证。

目前,各种解释过渡区红移和蓝移现象的机制还在不断被提出,而上述的几种主要机制对应的模型也在不断发展。人们无法简单地判断某种机制正确或者不正确,很可能各种机制对于过渡区谱线多普勒频移的产生都有贡献。但在不同的太阳大气条件下,由于局地大气环境不同,使得某种机制起主导作用;而在另外的条件下,则由另外一种机制起主导作用。

4.3 过渡区瞬变事件的产生机制

研究过渡区瞬变现象对于理解过渡区结构和日冕加热都具有重要意义,因此是过渡区研究中的一个重要课题。对于过渡区瞬变事件的产生机制,人们提出了多种解释,发展了许多模型,下面对其中的主要机制分别进行介绍。

对于过渡区的闪烁物,Harrison 等人^[49]认为是由网络磁场结构与新浮现的磁通量之间的磁场重联产生的。Doyle 等人^[42]进一步认为,新浮磁流在与原本存在的磁力线之间发生磁场重联后,在新形成的磁力线上部的较高温度和下部的较低温度还没来得及平衡,因此两者之间会形成一个温度断层;在沿磁力线的热传导的作用下,这个温度断层会向上传播,它通过整个过渡区所花的时间可与 CDS 和 SUMER 光谱仪的曝光时间(观测积分时间)相比拟。这相当于在曝光时间内,垂直向上的方向上,过渡区的等离子体密度增大了,因此可以观测到过渡区谱线辐射的增强。除此之外,Priest 等人^[50]认为,网络组织处的米粒组织压缩导致微小的

纤维状磁流管的温度有更长的时间在过渡区温度范围内, 这样对过渡区谱线来说, 它的辐射显然是增强了。而 Peter^[63] 认为, 闪烁物是由冷的磁环(伸展到过渡区)在其位于色球高度的足部被不对称加热, 形成沿磁环的层流, 这导致磁环在过渡区部分的填充因子增加, 从而使辐射增强, 而温度可以近似不变。各种产生机制虽然内在的物理过程不一样, 但是都有一个共同点: 闪烁物的本质不是温度的增强, 而是过渡区温度下辐射物质填充因子的增加。

Innes 等人^[39,40] 认为爆发事件对应于磁重联后产生的高速双向急流。目前, 爆发事件(或称过渡区的双向急流)磁重联的本质已得到广泛认可, 同时一些观测也都支持这一基本推测。最近, Chen 和 Priest^[66] 进一步认为, 过渡区爆发事件是由 P 模振荡调制的磁重联产生的, 重联的位置应该位于高色球(太阳表面以上 1 900 ~ 2 150 km 之间)。观测发现超过一半的爆发事件发生在闪烁物期间, 这使得人们开始研究两者之间的关系。目前, 多数人倾向于下面的观点: 爆发事件和闪烁物是不同的现象^[62], 爆发事件主要以与磁场重联相联系的高速外流(100 km/s 的量级)为特征, 而闪烁物主要是由各种导致过渡区辐射区域密度增加的过程产生的。

微 / 纳耀斑由于是微小尺度的耀斑, 因此耀斑的标准模型也极有可能是其产生和供能的机制。只是由于微 / 纳耀斑的尺度小, 目前无法完整观测出其中发生的过程, 因此这一推测还难以证实。Falconer 和 Moore 等人^[52,53] 认为, 位于网络组织的具有强剪切特征的所谓核心磁场区域低高度的磁环之间发生重联, 磁能转换为等离子体的动能和热能, 使得核心磁场爆发, 导致覆盖在核心磁场上面的磁拱升高, 而这正是微耀斑活动。升高的拱与附近的开放磁力线重联, 产生快速向上和向下运动的等离子流, 同时产生磁流体波, 两者产生的电流耗散足以加热日冕。很多人认为, 正是遍布整个太阳的微 / 纳耀斑, 使得太阳大气的温度在从色球经过渡区到日冕这一段迅速升高。

对于日冕亮点的产生与演化机制, 目前主要存在三种观点。一种是磁场相消的观点, Priest 等人^[44] 和 Parnell 等人^[45] 建立了不同极性的磁场区域通过重联相消产生日冕亮点的模型。该模型采用势场, 当不同极性的磁场区域相互靠近时, 局地发生磁重联, 并在重联区域加热了等离子体, 从而导致 X 射线和极紫外辐射的增强。这一模型可以解释日冕亮点发生过程中的多种现象, 从一开始就得到了广泛的支持。但是因为还有 1/3 的亮点并非与磁场相消相联系, 因此磁场相消模型并不适用于所有的日冕亮点。第二种观点是磁分界线重联, Longcope 等人^[23] 认为, 与日冕亮点相联系的磁场结构可以形成磁分界线重联位形, 磁分界线连接两个磁零点, 是快速磁场重联非常容易发生的位置, 沿磁分界线的重联导致过渡区和日冕局地的等离子体被加热, 从而产生日冕亮点。这种观点得到了一些观测结果的支持, 如 TRACE 的观测发现日冕亮点的位置和形态与根据势场外推得到的磁分界线的位置和走向比较接近^[21]。第三种观点是最近由 Büchner 等人^[46,47] 提出来的, 他们认为光球水平运动所诱发的电流片为亮点提供了能量来源。其数值模拟主要是解一组磁流体和中性大气的耦合方程, 首先对观测的光球纵向磁场进行无力场外推, 得到三维空间的初始磁场结构, 作为一个初始条件; 然后用色球和日冕等离子体来填充磁场结构。模拟开始后, 由于光球等离子体的运动, 日冕的磁场结构变得不再是无力场的, 在密度剧降的过渡区, 出现垂直的电流片和磁张力, 同时这些电流迅速在碰撞比较频繁的色球耗散。当局地电流密度(载流子速度)超过离子声不稳定性的阈值时, 反常电阻产生, 平行电场产生, 重联开始。电流片和三维磁场重联主要发生在过渡区。该

模型强调了光球等离子体水平运动的重要性, TRACE 的观测也显示了亮点的位置和形态与模型得到的重联区域相吻合^[46]。对于亮点的供能,不排除上述三种机制同时产生作用。当然也有可能对于不同的亮点,不同的机制起主导作用。

对于针状体形成机制,几十年来人们提出了许多不同的理论模型^[87],但是,由于针状体本身尺度很小且随时间高度演化,以往观测分辨率的限制使得针状体的形成机制研究存在不少困难。根据 Hinode 和 TRACE 的最新观测证据, De Pontieu 等人^[86]认为其形成机制至少存在波动驱动和磁重联驱动两种。首先,光球的对流运动和 P 模振荡波谱可能沿着倾斜的磁力线传播到色球层,形成激波继而驱动针状体喷发,这和针状体中有时观测到的周期约为 5 min 的振荡相符^[48,84,85];同时,磁重联机制可以用来解释他们观测到的寿命短(10~150 s)且喷发速度较快(50~150 km/s)的针状体。此外,另外一些专家则认为米粒组织的对流运动撞击磁流管底部可以产生旋转阿尔芬波,例如, Kudoh 和 Shibata^[51]根据观测到的针状体中等离子体的旋转往复运动,认为针状体是由旋转阿尔芬波驱动的等离子体沿磁圈运动产生的。

5 未来的研究方向

虽然在过去的十几年里,人们对太阳过渡区的了解已进一步深入,但是仍有很多未知现象和机制需要研究,下面列举了未来的研究需要加强的几个方面:

(1) 在观测上进一步研究发生在过渡区的各种时间和空间尺度的活动现象以及它们之间可能的相互关联, SUMER、CDS、TRACE 等仪器采集的大量数据仍有很多没有被人们充分利用。对这些数据的进一步分析将使我们过渡区的认识更加深入。

(2) 对于未来的观测仪器,需要进一步提高空间、时间和谱分辨率。TRACE 虽然有较高的空间分辨率和时间分辨率,但是它所能提供的谱线(或谱段)数量有限,且大多形成于色球和日冕,因此用其数据来研究过渡区的结构和特性受到了很大的限制;并且,TRACE 无法获得速度场的数据,这使得它提供的信息有很大的局限性。SUMER 具有不错的谱分辨率,但要研究高度动态的过渡区等离子体结构,其时间和空间分辨率仍有待提高。

(3) 将太阳磁场和极紫外观测的研究相结合。太阳过渡区是磁场控制等离子体的区域,只有将磁场和谱线辐射结合起来研究,才能更充分地理解光谱观测现象背后的物理过程。为了得到三维磁场结构,一个最常用的方法就是磁场外推,因此,发展更可靠的磁场外推方法是很重要的;另外,对色球和日冕磁场的观测技术突破也必将是长期被关注的课题。

(4) 将数值模拟与观测现象相结合,由此理解控制各种现象的物理过程。尤其是要通过模拟,增进对磁场重联这一日地空间基本的物理过程的理解。

参考文献:

- [1] Kjeldseth-Moe O. *The solar transition region Dynamic Sun*, UK: Cambridge University Press, 2003
- [2] Hassler D M, Dammasch I E, Lemaire P, et al. *Science*, 1999, 283: 810
- [3] Bartoe J D F, Brueckner G E, Purcell J D, et al. *Applied Optics*, 1977, 16: 879

- [4] Brueckner G E, Bartoe J D F, Van Hoosier M E. in Proc. OSO-8 Workshop, Hansen E, Schaefer S, eds. Boulder: Univ. Colorado Press, 1997, 380
- [5] Brueckner G E, Bartoe J D F. *ApJ*, 1983, 272: 329
- [6] Brueckner G E, Bartoe J D F, Cook J W, et al. *Adv. Space Res.*, 1986, 6: 263
- [7] Harrison R A, Sawyer E C, Carter M K, et al. *Sol. Phys.*, 1995, 162: 233
- [8] Wilhelm K, Curdt W, Marsch E, et al. *Sol. Phys.*, 1995, 162: 189
- [9] Lemaire P, Wilhelm K, Curdt W, et al. *Sol. Phys.*, 1997, 170: 105
- [10] Curdt W, Landi E, Feldman U. *A&A*, 2004, 427: 1045
- [11] Handy B N, Acton L W, Kankelborg C C, et al. *Sol. Phys.*, 1999, 187: 229
- [12] Reeves E M. *Sol. Phys.*, 1976, 46: 53
- [13] Patsourakos S, Vial J C, Gabriel A H, et al. *ApJ*, 1999, 522: 540
- [14] Schrijver C J. The Corona and the Solar Wind Near Minimum Activity, Wilson A, ed. Noordwijk: ESA, 1997: 149
- [15] Raju K P, Srikanth R, Singh J. *Sol. Phys.*, 1998, 178: 251
- [16] Simon G W, Leighton R B. *ApJ*, 1964, 140: 1120
- [17] Doschek G A, Bohlin J D, Feldman U. *Astrophysical Journal*, 1976, 205: L177
- [18] Teriaca L, Banerjee D, Falchi A, et al. *A&A*, 2004, 427: 1065
- [19] Priest E R, Hood A W, Bewsher D. *Sol. Phys.*, 2001, 205: 249
- [20] Zhang J, Kundu M R, White S M. *Sol. Phys.*, 2001, 198: 347
- [21] Brown D S, Parnell C E, Deluca E E, et al. *Sol. Phys.*, 2001, 201: 305
- [22] Madjarska M S, Doyle J G, Teriaca L, et al. *A&A*, 2003, 398: 775
- [23] Longcope D W. *ApJ*, 1998, 507: 433
- [24] Gabriel A H. *Philos Trans R Soc London A*, 1976, 281: 339
- [25] Athay R G. *ApJ*, 1982, 263: 982
- [26] Dowdy J F Jr, Rabin D, Moore R L. *Sol. Phys.*, 1986, 105: 35
- [27] Mariska J T. The Solar Transition Region. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992: 23
- [28] Mariska J T. *ApJ*, 1988, 334: 489
- [29] Peter H. *A&A*, 2001, 374: 1108
- [30] Dammasch I E, Curdt W, Dwivedi B N, et al. *Ann. Geophys*, 2008, in press
- [31] Feldman U. *ApJ*, 1983, 275: 367
- [32] Feldman U. *ApJ*, 1987, 320: 426
- [33] Feldman U, Laming J M. *ApJ*, 1994, 434: 370
- [34] Doschek G A, Mariska J T, Akiyama S. *ApJ*, 2004, 609: 1153
- [35] Athay R G. *ApJ*, 1984, 287: 412
- [36] Cheng Q Q. *A&A*, 1992, 262: 581
- [37] Hansteen V H. *ApJ*, 1993, 402: 741
- [38] Mariska J T, Boris J P. *ApJ*, 1983, 267: 409
- [39] Innes D E, Inhester B, Axford W I, et al. *Nature*, 1997, 386: 811
- [40] Innes D E, Toth G. *Sol. Phys.*, 1999, 185: 127
- [41] Harrison R A. *Sol. Phys.*, 1997, 175: 467
- [42] Doyle J G, Roussev I I, Madjarska M S. *A&A*, 2004, 418: L9
- [43] McClymont A N, Craig I J D. *ApJ*, 1987, 312: 402
- [44] Priest E R, Parnell C E, Martin S F. *ApJ*, 1994, 427: 459
- [45] Parnell C E, Priest E R, Titov V S. *Sol. Phys.*, 1994, 153: 217
- [46] Büchner J, Nikutowski B, Otto A. Coronal heating by transition region reconnection. *Coronal Heating, Proceedings of the SOHO-15*, Walsh R J, ed. 2004: 23

- [47] Büchner J, Nikutowski B, Otto A. Magnetic coupling of photosphere and corona: MHD simulation for multi-wavelength observations, Proceedings of the IAU Symposium of the Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, Stepanov A, Benevolenskaya E, Kosovichev A, eds. 2004: 223
- [48] Ajabshirizadeh A, Tavabi E, Koutchmy S. *New Astronomy*, 2008, 13: 93
- [49] Harrison R A, Lang J, Brooks D H, Innes D E. *A&A*, 1999, 351: 1115
- [50] Priest E R, Hood A W, Bewsher D. *Sol. Phys.*, 2002, 205: 249
- [51] Kudoh T, Shibata K. *ApJ*, 1999, 514: 493
- [52] Moore R L, Falconer D A, Porter J G, et al. *ApJ*, 1999, 526: 505
- [53] Falconer D A, Moore R L, Porter J G, et al. *ApJ*, 2003, 593: 549
- [54] 宋文彬, 冯学尚, 汪景琇. *天文学进展*, 2007, 25: 4
- [55] Dowdy J F Jr, Emslie A G, Moore R L. *Sol. Phys.*, 1987, 112: 255
- [56] Hansteen V H, Maltby P, Malagoli A. in ASP Conf. Ser. 111, Magnetic Reconnection in the Solar Atmosphere, Bentley R D, Mariska J T, eds. San Francisco: ASP, 1997: 116
- [57] Peter H. *ApJ*, 1999, 516: 490
- [58] Peter H, Judge P G. *ApJ*, 1999, 522: 1148
- [59] Dere K P, Bartoe J D F, Brueckner G E, et al. *ApJ*, 1989, 345: L95
- [60] Stucki K, Solanki S K, Schuhle U, et al. *A&A*, 2000, 363: 1145
- [61] Wilhelm K, Dammasch I E, Marsch E, Hassler D M. *A&A*, 2000, 353: 749
- [62] Brković A, Peter H. *A&A*, 2004, 422: 709
- [63] Peter H, Brković A. *A&A*, 2003, 403: 287
- [64] Habbal S R, Withbroe G L. *Sol. Phys.*, 1981, 69: 77
- [65] Aiouaz T, Peter H, Keppens R. *A&A*, 2005, 442: L35
- [66] Chen P F, Priest E R. *Sol. Phys.*, 2006, 238: 313
- [67] 涂传谔, 等. *日地空间物理学*. 北京: 科学出版社, 1988
- [68] Tu C Y, Zhou C, Marsch E, et al. *Science*, 2005, 308: 519
- [69] Tu C Y, Zhou C, Marsch E, et al. *ApJ*, 2005, 624: L133
- [70] Tu C Y, Zhou C, Marsch E, et al. Proceedings of the Solar Wind 11 / SOHO 16, "Connecting Sun and Heliosphere" Conference (ESA SP-592). Fleck B, Zurbuchen T H, Lacoste H, eds. 2005: 19
- [71] Marsch E, Zhou G Q, He J S, Tu C Y. *A&A*, 2006, 457: 699
- [72] Marsch E, Tian H, Sun J, Curdt W, Wiegelmann T. *ApJ*, 2008, in press
- [73] He J S, Tu C Y, Marsch E. *A&A*, 2007, 468: 307
- [74] He J S, Tu C Y, Marsch E. *Sol. Phys.*, 2008, 250: 147
- [75] Tian H, Tu C Y, Marsch E, He J S, Zhou G Q. *A&A*, 2008, 478: 915
- [76] Tian H, Marsch E, Tu C Y, Xia L D, He J S. *A&A*, 2008, 482: 267
- [77] Tian H, Xia L D, He J S, Tan B, Yao S. *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 2008, 8: 732
- [78] Tian H, Curdt W, Marsch E, He J S. *ApJ*, 2008, 681: L121
- [79] Tian H, Xia L D, Li S. *A&A*, 2008, 489: 741
- [80] Tian H, Tu C Y, He J S, Marsch E. *Adv. Space Res.*, 2007, 39: 1853
- [81] Xia L D. Ph. D Thesis, Gottingen: Georg-August-Univ. 2003
- [82] Xia L D, Marsch E, Curdt W. *A&A*, 2003, 399: L5
- [83] Xia L D, Marsch E, Wilhelm K. *A&A*, 2004, 424: 1025
- [84] Xia L D, Popescu M D, Doyle J G, et al. *A&A*, 2005, 438: 1115
- [85] De Pontieu B, Erdélyi R, James S P. *Nature*, 2004, 430: 536
- [86] De Pontieu B, McIntosh S, Hansteen V H, et al. *PASJ*, 2007, 59: S655
- [87] Sterling A C. *Sol. Phys.*, 2000, 196: 79
- [88] Ugarte-Urra I, Doyle J G, Madjarska M S, et al. *A&A*, 2004, 418: 313
- [89] Ugarte-Urra I, Doyle J G, Madjarska M S, et al. *A&A*, 2004, 425: 1083

Structure and Characteristics of the Solar Transition Region

TIAN Hui^{1,3}, TAN Bo¹, XIA Li-dong², HE Jian-sen¹, ZHOU Gui-qing¹

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Space Science and Physics, Shandong Univ. Weihai 264209, China; 3. Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau, Germany)

Abstract: The solar transition region, in which above the photosphere the temperature increases rapidly and the density drops dramatically, is a rather inhomogeneous and dynamic layer between the chromosphere and corona. The transition region is believed to play an important role in the origin of the solar wind and in coronal heating. The most prominent feature in the transition region is the network structure, which is the upward extension of the supergranular boundary above the photosphere and manifests itself as bright lanes on the radiance images of FUV/EUV lines. It is believed that the network fluxes consist of two components: the magnetic funnel, either open into the corona and guiding the solar wind or being simply the leg of a large coronal loop, and low-lying flux ropes in the rest of the network. Most of the FUV/EUV emission lines formed in the middle transition region show a predominant red shift, which can be caused by the return of spicule materials, siphon flows driven by asymmetric heating through loops, nano-flares and the resulting downward propagating waves, or downward flows after magnetic reconnection between open field lines and closed loops at the upper transition region in the network. While for lines formed in the upper transition region and lower corona, a net blue shift is found, which is believed to be associated with the nascent solar wind outflow. Lots of transient phenomena are found in the transition region, including blinkers, explosive events, micro/nano flares, coronal bright points, and spicules. Blinkers are transient brightenings with a life time of 3–110 minutes and caused by a process which can lead to the increase of density or filling factor of the transition region. Explosive events correspond to outflows (at the order of 100 km/s) in magnetic reconnection. Micro/nano flares are believed to play a very important role in heating the corona. Coronal bright points are local heating phenomena occurring in the transition region and lower corona, the related powering could be due to magnetic cancellation, separator reconnection, or current sheet induced by photospheric horizontal motions. Spicules are rapidly evolving jet-like structures extending from the chromosphere upward into the corona and, according to the new observational evidence of Hinode and TRACE, may be driven by both wave and magnetic reconnection in the chromosphere.

Key words: Solar Physics; Solar Transition Region; UV radiation