

# 冰火两重天:为什么日冕如此炽热而日珥却如此清凉?

(中国科学院国家天文台 张 枚 编译自 Jack B. Zirker, Oddbjørn Engvold. *Physics Today*, 2017, (8): 36)

近几十年来,太阳物理学家在回答两个长期存在的问题上取得了稳步的进展。

本月21日,数百万天文爱好者将在美国享受一场被称为日全食的盛宴。如果天气好的话,在两分钟的黑暗中,他们将看到太阳外部的光度极度微弱的大气——日冕,以及沉浸在日冕中被称为日珥的红色羽状物质。

从20世纪40年代开始,天文学家就已经知道,日冕比太阳的表面——光球——要热一百万度。然而,沉浸于其中的日珥却与光球有着几乎相同的温度。这两个观测现象都同样令人困惑。为什么在温度5500 K的光球以外存在着一个百万度高温的日冕?日珥是如何在热的日冕中形成并维持的?

科学家已经提出了许多猜测和解释,但在细节上却争论不休,并未达成共识。而且,随着观察资料质量的不断提高,问题似乎变得越来越复杂。

## 炙热的日冕

发现日冕具有百万度高温经历了几个不同的阶段。早在1869年,天文学家 Charles Young 和 William Harkness 就独立地在日全食观测中发现了日冕光谱中存在一条无法证认的谱线。60年后,物理学家 Bengt Edlén 证认出许多原先无法证认的“冕线”实际上源自高度电离的铁、镍等金属,而要想产生这些离子必须要一百万到五百万度的高温。

火箭上的X射线波段观测进一

步证实了高温日冕的存在(图1),而不同特征的X射线亮度与光球磁场强度的高度相关性又暗示着磁场可能在日冕加热中起了重要的作用。

与此同时,1958年 Eugene Parker 预言,高温的日冕必然会向外膨胀并形成太阳风。1959年的苏联卫星观测和1962年的美国卫星观测很快证实了这一预言,在地球附近测到了速度高达700 km/s的太阳风。

科学家们相信,加热日冕和加速太阳风的能量极有可能来自于太阳表面以下的对流层。但是,这些能量是如何被传输到 $10^4$ — $10^5$  km高度的日冕中,有两大类不同的模型。

一种是波加热模型,这类模型认为是阿尔芬波把能量带到了日冕中。但由于阿尔芬波不压缩周围气体,因此能量不能有效耗散。于是,一种阿尔芬波湍流模型被提出来。这种模型认为,由于从色球到日冕的密度极速下降,不同波之间的非线性相互作用会产生湍流,进而加热太阳过渡区及更高的日冕。

另一类模型认为,光球的对流会造成磁力线的缠绕,进

而形成电流片。这些电流片会发生磁重联,改变磁场拓扑结构,从而把磁能转化成热能而加热日冕。例如,1964年 Thomas Gold 提出,磁重联可以解释太阳耀斑。1972年 Parker 更是提出了磁重联加热日冕的“拓扑耗散”概念,并于1988年提出了“微耀斑”加热日冕模型。

在检验这些模型和概念的过程中,卫星观测起到了极其重要的作用。继 Skylab(1973—1979)之后,相继发射了 Yohkoh 卫星(1991—2001)、太阳和日地天文台(SOHO, 1995年至今)、过渡区和日冕探测器(TRACE, 1998—2010)、日出卫星

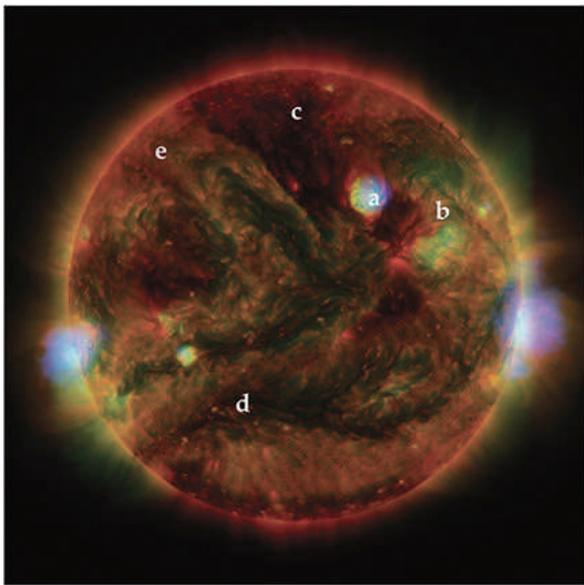


图1 由3个空间望远镜观测合成的太阳X射线像。蓝色显示了高能X射线波段结构,绿色显示低能X射线波段,黄色和红色显示极紫外波段。标识(a)处为具有密集环形磁力线的高温活动区,(b)是连接两个活动区的冕环,(c)对应北极上空的冕洞,其中大量离子和电子沿着开放磁场线逃出,(d)是被称作亮点的小活动区,(e)为背景区域



图2 2002年7月21日由位于加利福尼亚州的大熊湖天文台观测到的极冠日珥。插图显示的是使用Mauna Loa天文台的MK4仪器在白光下观察到的相应日冕暗腔结构

(Hinode, 2006年至今)以及太阳动力学天文台(SDO, 2010年至今)。这些卫星可以通过在紫外、极紫外和X射线波段上成像来探测不同温度的日冕结构,并且每一个观测设备都拥有比之前设备更高的空间、时间和光谱分辨率。

科学家试图通过这些观测来区分和证认两种不同的日冕加热模型,但结果却跌宕起伏。1995年Toshifumi Shimizu分析了Yohkoh卫星数据,认为日冕亮点代表的微耀斑不足以加热日冕。2007年Steve Tomczyk首先探测到了日冕阿尔芬波,但他的估算却认为阿尔芬波携带的能量不足以加热日冕。2011年Scott McIntosh及其合作者在II型针状体中探测到了阿尔芬波,他们认为这些针状体可能对日冕加热起到了重要的作用。

### 炙热日冕中的冷日珥

与热的、稀薄的日冕对应的是漂浮其中的日珥。1842年,也是在一次日全食观测中,Francis Baily观测到日珥并不随着月亮的移动而移动,因此他推测日珥是太阳大气的一部分。

1903年,Ferdinand Ellerman和George Ellery Hale证明,在太阳边缘看到的日珥和在太阳表面看到的

暗条实际上是同一物质。图2显示了一个围绕太阳北极的日珥,怎样在太阳表面表现为暗条。日珥比色球更暗,意味着其等离子体温度比色球温度还要低约10000 K。

利用辐射转移模型,我们可以计算日珥的温度、密度、压强、电离度等参数,甚至估算日珥的质量。基于紫外光和白光波段的光谱诊断,可以推算出日珥的温度为6000—8000 K,粒子密度为 $10^{10}$ — $10^{11}$   $\text{cm}^{-3}$ 。虽然这些密度比光球低了百万倍,但却比周围的日冕大了100—1000倍。

1908年Hale首先发现了太阳上存在强磁场,1950年Harold Babcock和Horace Babcock父子发明了能够测量太阳表面弱磁场的磁像仪。通过磁像仪观测,科学家发现日珥通常位于光球磁中性线的上方。日冕中,日珥和其周围的冕环之间存在着一个被称为暗腔(cavity)的结构(图2)。对这些在高密度日珥之上的被磁场隔离开的低密度热区域的作用目前仍存在争议。

通常认为,磁场支撑了日珥,使其没有因为重力的影响而坠落。磁场还起到了使日珥与周围热的日冕之间绝热的作用。同时,等离子体还被“冻结”于磁场中,使得物质只能沿着磁力线方向自由

运动。

高分辨率观测发现,暗条实际上由许多细丝组成,而目前的模型仍然难以解释为何会形成那些几近垂直的、能够跨越几个重力标度而不会坠落的细丝,瑞利—泰勒不稳定性可能是其中的一个原因。

日珥通常会在其磁通道笼中保持数天甚至数周的稳定,但最终它们中的大多数还是会爆发,进入日冕和行星际空间。在爆发前的几个小时,它们通常会以0.1—1 km/s的速度缓慢上升,然后进入一个快速加速阶段,并最终100—1000 km/s的速度逃离太阳。这一系列过程通常被认为是一个日珥和其周围日冕结构失去平衡所导致。携带了周边日冕物质的爆发日珥,可以将磁场和大量的等离子体物质带到日地空间,从而形成最引人注目的太阳活动事件之一:日冕物质抛射。

### 未来诚可待

对于太阳物理学家来说,这是一个激动人心的时代。NASA计划于2018年发射的Parker太阳探针探测器和欧洲宇航局的太阳轨道探测器将飞到比以往任何太空飞船更接近太阳的地方。在地面上,位于夏威夷的4 m口径的Daniel K. Inouye太阳望远镜将于2018年完工,成为世界上最大的太阳望远镜。这些和其他下一代仪器都无疑给太阳物理学家们带来了诸多期待。通过新仪器提供的精湛的观察结果,并加之数值模拟进展,研究人员可以期望在解决日冕是如何加热到数百万度高温以及日珥是如何在这种高温环境中产生和生存等问题取得深入进展。