

等离子体波改变太阳成分

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Michael Hahn. *Physics*, May 22, 2024)

日冕是由炽热而稀薄的等离子体构成的光晕，围绕着太阳向外延伸，通常被太阳表面或光球层的强光所掩盖，但在日蚀期间可见。日冕中的化学元素含量与太阳其他部分不同。意大利国家天体物理研究所(INAF)的 Mariarita Murabito 及其同事进行的测量表明，这种差异是因为等离子体波将太阳低层大气中易电离的元素拖入日冕造成的。

太阳物理学家对日冕感兴趣，部分原因是日冕产生太阳风(热气流)。太阳风引起的最明显的现象是当其粒子被困在地球磁场中，与大气相撞产生的极光。太阳物理中的一个重要问题是确定哪种日冕结构产生太阳风，以及太阳条件如何影响这种热气体流出的特性。一旦太阳风离开太阳，这种成分就不会改变。可以通过航天器对太阳风进行采样，其元素丰度可以与从光谱学推断的日冕丰度进行比较。

日冕中的元素丰度与光球层中的元素丰度之差别取决于每种元素的第一电离势(FIP)，即从中性原子中除去单个外层电子所需的能量。测量表明，FIP 低于 10 eV 的元素

(如硅、镁和铁)在日冕中的丰度比在光球层中大几倍。相反，FIP 高于 10 eV 的元素(如氧、氖和氩)在日冕和光球层中的丰度相似。这种现象被称作 FIP 效应。在太阳磁场形成闭环的区域，如太阳赤道附近可观察到这种效应，在磁场开放的地方，如延伸到太空的很远处，比如两极，FIP 效应相对较弱或不存在。此外，测量发现，慢速太阳风倾向于显示出 FIP 效应，而快速太阳风则不显示。这些观测表明，慢速的太阳风来自赤道区，而快速的太阳风往来自两极。

日冕中的物质是由光球层提供的，因此两者在成分上的差异令人费解。FIP 效应的阈值 10 eV 与受激氢原子发射的辐射能量相匹配的现象成为解决这个难题的线索。在色球层(光球层和日冕之间的薄层)中，低 FIP 元素可以被这种辐射电离，而高 FIP 元素则不能。这表明在色球层中有某种过程，把低 FIP 元素的离子推入日冕，而留下高 FIP 的中性原子。

Murabito 和他的同事研究了引起这种过程的一个主要解释，即所谓的阿尔芬(Alfvén)波。它是等离子体中的低频电磁波，沿着等离子体的磁场传播，使流体和磁场一起运动。阿尔芬波的不均匀电场对带电粒子施加一种力，称为有质动力，它与真空中电磁波施加的辐射压力有关。

在日冕中，阿尔芬波沿着一个封闭的磁环移动，在磁环进入光球

层的两个脚点之间来回反弹，并在环的两侧与色球层发生碰撞。在脚点，波对等离子体中的离子施加强烈的有质动力，把它们拖入日冕。相比之下，在开放磁力线上移动的阿尔芬波远离太阳，不会产生很强的有质动力，因此没有 FIP 效应。计算表明，这种现象可以定量地再现日冕中观测到的元素丰度。

为验证这一解释，Murabito 等结合了两套数据：由 Hinode 卫星上的极紫外成像光谱仪对日冕中 FIP 效应的测量，以及由新墨西哥州 Dunn 太阳望远镜上的干涉二维光谱仪对色球层阿尔芬波的测量。他们对太阳活动区——太阳黑子上方的日冕和色球层进行了研究。在活动区的一侧，Murabito 等发现了明显的 FIP 效应和强烈的阿尔芬波，其中一些波向着色球层往内移动。在另一侧，只看到可以忽略不计的 FIP 效应和微弱的阿尔芬波，正在远离太阳。这些发现都与 FIP 效应的有质动力解释一致，研究人员进行的附加的定量比较和数值模拟支持这一结论。

关于 FIP 效应的理论将了解太阳和其他恒星提供新的可能。如果已知的 FIP 效应是由阿尔芬波有质动力引起的，就有可能推断出更多关于太阳风的源头的磁性结构和阿尔芬波的更多细节。在其他恒星中也观察到了 FIP 效应，因此，了解其机制可以深入了解这些恒星的色球层和日冕的结构。



2024年4月8日，日全食期间在美国达拉斯拍摄的日冕照片