

太阳风的起源

Genesis of the Solar Wind

太阳风是弥漫于整个日球(heliosphere)的高速带电粒子流,它和它携带的磁场是太阳与整个日球联系的纽带,并通过与星际介质的相互作用决定着日球的形状和尺寸。此外,由近日区向行星际空间传播的过程中,太阳高能粒子以及日冕物质抛射等可能危及地球空间环境的爆发事件会受到背景太阳风的可观影响。因而了解太阳风的性质不仅具有天文学上的一般重要性,而且对于准确地预报有灾害性影响的空间天气事件也具有重要价值。在太阳风的研究中,太阳风的起源问题(包括源区的认证以及初生太阳风由约 10km/s 加速至数百 km/s 的机制)占据着核心的地位,同时也是空间物理领域最重要却悬而未决的课题之一。

1958 年 Parker 做出太阳风的理论预言时,相关观测手段还相当有限,因而 Parker 并未指明太阳风会与何种日冕结构相关。20 世纪 60 年代初,太阳风的存在为飞船所证实,同时探空火箭的使用也使得日面的紫外和 X 线观测成为可能,太阳风源区的认证研究就开始了。当时发展并沿用至今的一个主要方法是利用光球磁图并基于某些假设来构造日冕磁场模型,而后将太阳风的局地测量数据映射到日冕某高度,并由该高度沿开放磁力线向日面寻找太阳风的源区(图 1 示范的是此方法的现代应用)。利用这一思路,有早期研究将 Vela 和 Pioneer 等飞船的太阳风数据与日面软 X 线图像做了比对,确认了延伸至赤道附近的大冕洞^①是重现性高速流(速度高于 600 千米每秒的太阳风)的源头所在,事实上这也是迄今最具说服力的太阳风源区认证研究。人们随即发现地球轨道处太阳风的来源不局限于冕洞,活动区附近的开放场区也有贡献,而且太阳风速度与它所在磁力管截面积的增长(可用膨胀因子来衡量)之间存在负相关^[2]。20 世纪 80 年代末利用 1967 年起长达 22 年的数据的一项统计研究表明该经验关系相当普遍地成立,因而成为太阳风加速机制的一个重要约束^[3]。

1990 年前研究者倾向于视太阳风为沿永久开放磁力线的稳态流动,高速流来自高纬冕洞,低速流则源于冕流亮度边界附近磁力线在日面的足点。基于这一源头观,在物理机制方面,人们最初并不关心开放区日冕何以取得百万度高温这一点,而把笼统定义的冕底当作底边界来考察太阳风的加速问题,通过电子由该高温边界

^① 这里我们仿效 Cranmer^[5]基于观测来定义冕洞为日面上或者日面边缘之外紫外或 X 线辐射强度较低的部分。

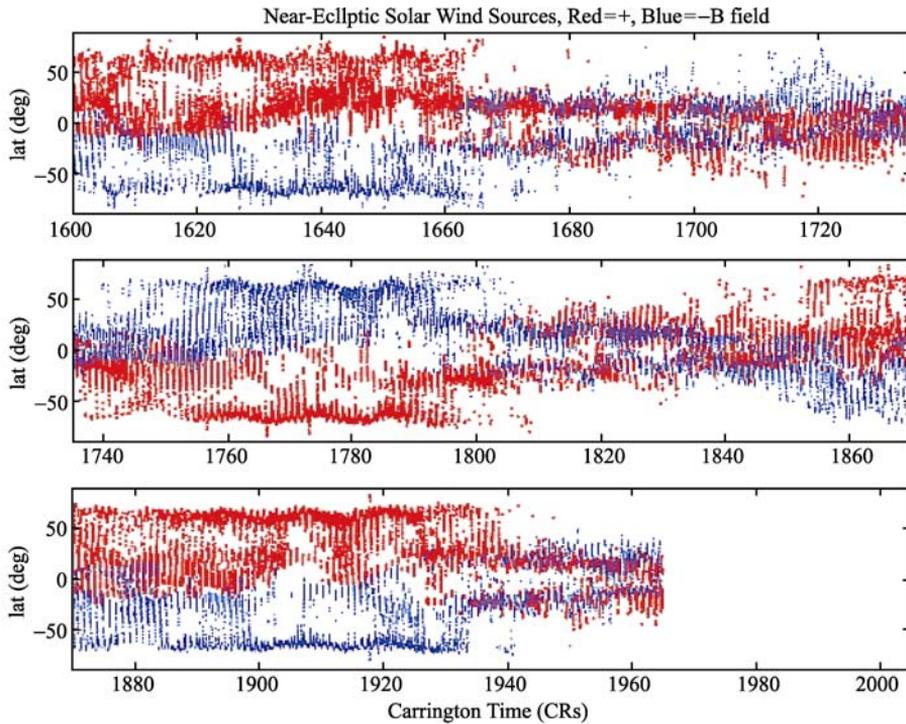


图1 Carrington周1600至1965(对应于1973年4月至2000年8月)低纬太阳风在光球上的源区。这是Luhmann等人利用Mt Wilson天文台的光球磁图历史数据,基于势场假设重构了这27年间日冕磁场位形之后,通过磁力线追踪技术找到的日心纬度低于20度的开放磁力线在光球的足点。图中蓝色(红色)表征光球磁场指向内(外)。由图中可以看到,有相当长的时间内低纬太阳风源自低纬处混合极性区域,这对应于太阳活动上升期及极大期^[1]

向外的热传导来为太阳风供能。但这一电子驱动的理论无法解释高速流的性质。进而人们认识到太阳风的流动应被看做开放区日冕加热的一个自然后果:亚光球层次的对流运动将机械能以磁流体波或其他形式注入磁流管,波通过湍动耗散等机制来将物质加热到日冕温度,此高温相应的向外的压强梯度自然地提供太阳风的起始加速。为产生高速流,该理论要求至少在初始加速阶段,质子而非电子应得到优势加热。不过该质子驱动的理论预言质子在日冕区温度可高达数百万度,这与当时的探空火箭所得的结果不符,因而陷入困境^[4]。

20世纪90年代之后,随着以Ulysses、SOHO为代表的一系列飞船的升空,太阳风的起源研究得到了长足的进步。一方面太阳风的局地数据中,除了质子与 α 离子外,痕量元素如氧、铁、硅等的测量也成为常规。由于痕量元素在太阳风高速流与低速流中的性质有很大区别,寻找这种区别在日冕中的对应就成为太阳风源区认证的一个新的出发点。另一方面,随着日面的紫外和X线的成像及谱观

测精度的提高,寻找太阳风在过渡区乃至色球层次的源头成为可能;不仅如此,日心距离约 1.5 太阳半径之外延伸日冕的白光和紫外测量还为新生太阳风在这一关键区域的加速提供了重要信息。

Ulysses 的观测表明,在太阳活动低年,太阳风参数对日心纬度的依赖关系相当规则:一个宽约 30° 的变化显著的低速流(速度约 400km/s)嵌在南北两股均匀的高速流之间。此时太阳的位形也相当简单,最显著的特征是冕仪图像中赤道附近亮的冕流带。研究发现,绝大部分的高速流来自太阳两极的冕洞,其下超米粒组织边界处紫外谱线的蓝移则是初生高速流的表征,而该蓝移位于日面之上 5000~20000km 处的磁漏斗结构中^[6]。另一方面,研究者普遍认为低速流和冕流结构有关,少量低速流来自冕流尖点处磁闭合区域物质的间歇式释放,其余则来自冕流亮度边界相应的开放区。这部分低速流可能源于冕洞的周边区域,或者活动区闭合磁环体系附近具有单一极性的磁开放区,且与高速流类似,在紫外图像中也呈现为网络组织边界上的蓝移^[7]。2006 年发射的 Hinode 飞船的观测表明,在日面的软 X 线图像中,源于活动区的低速流呈现为相当平稳的流动,它占总的低速流的比例可高达 1/4^[8]。在物理机制方面,延伸日冕观测显得尤为重要。观测表明冕洞之上的延伸日冕中质子温度高于电子值,少数离子的温度又高于质子值(二者比值超过离子的质量数)且其垂直温度高于平行温度,这些观测特征使得人们重新拾起质子驱动太阳风的理论观点。不仅冕洞如此,冕流边界处测量结果也被发现有类似特征。因而现在的共识是对于离子优势加热的那些机制(如离子回旋共振)不仅对高速流来说至关重要,而且可能也适用于部分低速流^[5]。

在太阳活动高年,太阳风与太阳的位形都非常复杂。Ulysses 的测量结果中,太阳风呈现为一串串相继出现的变化剧烈的中、低速流。而相应时段的日面上极区冕洞缩小甚至消失,中低纬度则出现大量的小冕洞。基于势场的磁场外推模型表明,在活动峰年向行星际开放的磁通多数来自这些小冕洞,但活动区边缘及内部的贡献也可达 30~50%。这使得研究者公认活动区周边区域对太阳风会有可观的贡献,但对其具体源头则很有争议。目前被接受的可能的源区有活动区内部及边界的开放场、活动区附近的小冕洞以及极区冕洞的内边界等^[9]。

上述讨论中都假定太阳风主要来自单极性的开放场区。然而 SOHO 飞船的日面紫外成像观测发现,无论高年或低年,日面都充斥着各种尺度的环状闭合结构,即便是冕洞这样以开放场为主的区域也不例外,只不过冕洞内的环尺寸较小(高度低于 15000km)、温度较低(低于 80 万度),而冕洞之外环的尺寸较大(高约 4~40 万千米)、温度较高(约 150 万度)。环状结构的无处不在导致了一个全新的太阳风起源说即开闭磁场耦合说。在这一理论中,开放磁场与闭合磁环的重联释放出环内物质并为之提供能量,环内物质沿新形成的开放力线的流动即为太阳风。它可解释太阳风局地测量中氧电荷态与速度的相关关系,也可以通过磁环在浮现后到与开放力线重联前

集聚物质的过程长短来为低电离势的痕量元素丰度对太阳风速度的依赖提供定性说明。目前这一起源说正越来越受关注^[10]。

太阳风起源研究的主要困难来自源区认证以及加速机制两方面。在源区认证方面,由于日冕磁场直接测量的困难,所有通过磁联系来寻找源区的工作都依赖于日冕磁场模型,而这类模型又极大依赖于若干无法通过观测约束的参数。在加速机制方面,基于波动或者湍流的理论最大的问题在于人们至今对磁流体湍流仍知之甚少,而对湍流在高频或者高波数区的动力学耗散的描述尤为困难。不过令人欣慰的是,在日冕这类低热压磁压比的等离子体中磁流体湍流的研究正取得进步,相应的太阳风模型计算结果已可以接受观测检验^[5]。另一方面,开闭磁场耦合起源说的理论还远谈不上完善,它的各个要素基本上都还停留在定性描述阶段。就磁环对物质的储存过程而言,人们还不了解物质是如何集聚的以及集聚的物质中元素丰度依赖于哪些因素。就磁环与开放力线的重联而言,人们对物质释放的具体过程、重联所释放的能量在粒子动能、热能及电磁能间的分配都不了解。就重联所形成的初生太阳风的进一步加热加速来说,重联过程所激发的高频或低频、平行或斜传波动等的贡献都还缺乏细致研究。至于太阳风的单极开放场起源说与开闭磁场耦合起源说是否同时成立、其各自的相对贡献又如何等则尚无定论。

对太阳风起源的更深入了解是未来若干卫星的主要科学目标。我国规划的“夸父”卫星将是 2015 年后第一 Lagrange 点处太阳风数据的主要来源,不仅如此,它对内日冕的连续的可见光和紫外成像观测将极大促进人们对太阳风初始加速区的了解。而计划于 2015 年发射的 Solar Orbiter 飞船的近日点为 48 太阳半径,在纬向则可到达日心纬度 30°的区域。它将提供内日球层太阳风中粒子和磁场的信息,并将能分辨太阳大气在约 200km 尺度上的动力学演化,从而帮助人们了解太阳风物质和能量的输运过程。另一尚处于预研阶段的 Solar Probe Plus 飞船将贴近黄道面飞行,但其近日点将为日心距离 9.5 太阳半径处。之所以要到这一前所未闻的近距离来观测太阳,是因为 Solar Probe Plus 首要的科学目标就是确定太阳风源区磁场的结构和动力学,追踪用以加热日冕和加速太阳风的能量的流动并明晰其热力学。可以预见,这些项目的实施将大大增进人们对太阳风起源的认识,并可能对太阳风的加热加速机制做出革命性的贡献。

参 考 文 献

- [1] Luhmann J G, Li Y, Arge C N, et al. Solar cycle changes in coronal holes and space weather cycles, *J. Geophys. Res.*, 2002(107), A08, 1154, 10.1029/2001JA007550.
- [2] Zirker J B (ed.) *Coronal holes and high speed wind streams: a monograph from Skylab solar workshop*, Boulder: Colorado Associated University Press, 1977.
- [3] Wang Y M and Sheeley Jr N R. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion, *ApJ*, 1990,

- (355): 726–732.
- [4] Hollweg J V. Drivers of the solar wind: then and now, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2006(364), 505–527.
 - [5] Cranmer S R. Coronal Holes, *Living Rev. Solar Phys.* 2009, (6): 3 <http://www.livingreviews.org/lrsp-2009-3>.
 - [6] Tu C Y, Zhou C, Marsch E, Xia L D, Zhao L, Wang J X and Wilhelm K. Solar Wind Origin in Coronal Funnels, *Science*, 2005, (308): 519–523.
 - [7] Marsch E, Wiegmann T and Xia L D. Coronal plasma flows and magnetic fields in solar active regions. Combined observations from SOHO and NSO/Kitt Peak, *A&A*, 2004, (428): 629–645.
 - [8] Sakao T, Kano R, Narukage N, et al., Continuous Plasma Outflows from the Edge of a Solar Active Region as a Possible Source of Solar Wind, *Science*, 2007, (318): 1585–1588.
 - [9] Kohl J L, Noci G, Cranmer S R, Raymond J C. Ultraviolet spectroscopy of the extended solar corona, *Astron. Astrophys. Rev.*, 2006, (13): 31–157.
 - [10] Feldman U, Landi E, Schwadron N A. On the sources of fast and slow solar wind, *J. Geophys. Res.*, 2005, (110): A07109, doi:10.1029/2004JA010918.

撰稿人：李波 陈耀

山东大学威海分校空间科学与物理学院