

日冕的难解之谜

(南京大学 陈鹏飞 编译自 Philip G Judge. *Physics World*, 2021, (9): 38)

当月亮把太阳完全遮挡住时，便出现了日全食现象。这时候四周漆黑如夜，你看不到太阳，却能看到笼罩在太阳周围的淡淡光辉，这就是日冕！日冕的亮度只有太阳表面的百万分之一，然而其温度却比太阳表面高1百万度。如此反常的现象早在70多年前就被发现了，但至今仍是天文学中最大的谜团之一。

人类至少在5000年以前就通过日全食观测到过日冕。不过，日全食比较罕见，每年也就在一些特定的地方能看到几分钟。幸运的是，法国天文学家利奥在20世纪20年代发明了日冕仪，我们得以随时观测日冕，而不是要等上一年才能看几分钟。利用日冕仪观测数据，瑞典物理学家艾德伦在1943年终于弄清楚了日冕中一些来历不明的谱线的产生原因：日冕中的铁元素最外层的十几个电子被剥离后形成离子，

电子与离子碰撞产生这些谱线。由于铁元素必须在1百万度的环境下才能够让最外层的十几个电子剥离，因此他推断日冕的温度超过1百万度。

这个推论犹如石破天惊，一时让人难以接受。这是因为太阳的热源是太阳中心的核聚变，热量由内而外传递。如果日冕温度超过1百万度，那就意味着热量要从6千度的“低温”太阳表面传递到1百万度的高温日冕。这显然违背了热力学定律！唯一的可能性便是存在着某种“非热”机制，它把能量从太阳内部带到日冕，并耗散成日冕的热能。于是，人们自70多年前便开始了寻找这种“非热”机制的漫漫征程。

有趣的是，在二战期间，这些科研活动还有着浓厚的政治色彩。因为日冕经常释放出高能粒子，伴随X射线和极紫外射线辐射的增

强，从而导致地球电离层的剧烈扰动，有时还引发无线电信号中断。为了确保军方无线电通讯顺畅，很多国家部署了日冕仪，以便预测何时可能出现无线电中断。

1973年，美国宇航局将阿波罗登月计划留下的一个指令仓发射上天，建成了世界上首个空间站——“太空实验室”，开始了太阳极紫外射线和X射线辐射的常规观测，从而让我们认

识到太阳的磁场如何影响日冕的结构、动力学和物质加热。

此后有很多卫星项目对太阳进行了大量的观测，让我们获得了太阳在极紫外射线和X射线甚至伽马射线等多波段辐射的详细情况。尤其值得一提的是，2010年美国宇航局发射了“太阳动力学天文台”卫星，其高清相机提供了日冕的大量数据。既然已经获得了那么多信息，人们为何还在为日冕的加热机制而争论不休呢？

悬而未决的难题

如果向一群天文学工作者咨询日冕加热机制，你肯定会惊讶地发现，答案五花八门。有的说“磁能”，有的说“阿尔文波”或“纳耀斑”，也有人说“湍流”、“离子回旋波”或是“磁重联”。自1943年至今，有关日冕加热的话题，平均每天就有一篇文章发表。

这个谜团的物理背景倒也不复杂。太阳核心区的氢聚变反应为太阳提供着能量，其中微不足道的一小部分(不到十万分之一)会变成磁场的自由能。磁自由能通过某种方式从太阳内部传输到太阳大气中，并耗散成为日冕的热能。不过，问题是我们没看到转换的过程，只看到了转换的结果。这就好像我们抓住一个带着赃物逃跑的窃贼一样，我们只看见了赃物，却没看到其作案过程。

从某种意义上讲，弄清楚日冕加热的原因应该不是难事，毕竟只



图1 捷克的德鲁克缪勒博士于2020年在阿根廷日全食期间拍摄的日冕照片

需要用到太阳能量的十万分之一就足以加热日冕。不过，也正是因为只需要一点点能量，几乎任何磁能传输机制都足以维持日冕加热。这样就很难排除任何一种理论模型了。一位天文学家开玩笑说：“这么多方式都可以加热日冕，日冕本应该更热一些才对啊！”

麻烦的根源就在于组成太阳的物质是等离子体。当气体温度持续升高，原子会分解成自由离子和电子。这种炽热的电离气体便是等离子体。瑞典学者阿尔文发现，在大的空间尺度上，日冕等离子体就像电阻等于零的理想磁流体，磁能可以传输，但无法耗散。只有在100 m的空间尺度上，离子和电子的独立运动带来了非理想的效应，伴随磁能耗散。为了描述在这个尺度上发生的事情，研究人员不得不求解微观粒子动力学。

计算与观测

在现代社会，像天气预报这样的复杂问题大多是通过计算机数值模拟来解决的，你也许会好奇为什么我们不能通过数值模拟来揭示日冕加热之谜。很不幸的是，日冕加热问题涉及从宏观尺度到微观尺度的各种动力学过程，而即使是目前最好的计算机也没有足够的内存来实现。

我们来看看这个问题有多难。一个太阳活动区的典型尺寸是50000 km。为了研究这个区域内发生在100 m这样微观尺度上的能量耗散过程，需要将太阳活动区划分成10亿亿个计算单元。这显然是目前的计算机无法实现的。

为了规避这个难题，通常的做法是利用前苏联物理学家科尔莫戈罗夫发展的湍流理论。根据

该理论，流体运动的能量自发地从大尺度转移到更小尺度，直到耗散成热能的微观尺度。从这个角度来说，这个计算难题在2005年已经被北欧太阳物理学家“解决”了。他们只用了337万5千个计算单元，对于在更小空间尺度上发生的过程，他们采用科尔莫戈罗夫模型作为近似。至于这种做法是否可靠，目前还很难说。

在观测方面，全世界目前最好的太阳望远镜只能分辨200 km的结构，离100 m的目标相差甚远。你也许会问：难道我们就不能提高观测分辨率么？问题是，如果想同时捕捉到日冕能量的传输和耗散过程，需要在太空中建造一架口径45 m的极紫外射线望远镜，而且所配备相机的像素数要达到当今最好相机的400倍。这简直是天方夜谭。

更麻烦的是，日冕中热传导速度非常快。一旦日冕中出现了局部加热，电子会以迅雷不及掩耳之势将热量分配到几千千米之外。这就好像小偷瞒天过海，把犯罪证据从作案现场转移到天涯海角。

当然，也不用太悲观！天文学家一向擅长根据物理定律来解决任何棘手的问题。我坚信天文学家一定能解决日冕加热问题。事实上，美国天体物理学家帕克在1972年提出过一个巧妙的思想实验，这使得日冕加热问题的进展突飞猛进。

帕克的钢琴

帕克把日冕加热问题简化成这么一个过程：想象日冕中的一个长

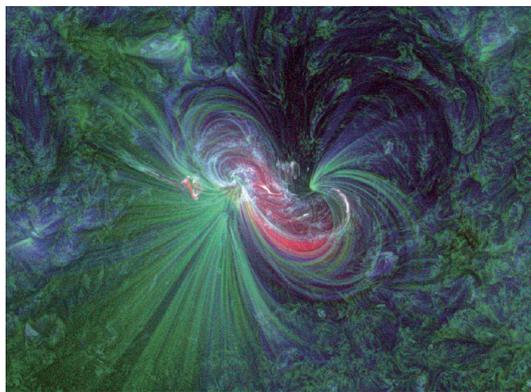


图2 美国宇航局“太阳动力学天文台”卫星搭载的“大气成像组件”望远镜拍摄的日冕一隅。此图为极紫外多波段合成图，其中红色部分对应5百万度的物质，蓝色对应1—2百万度的物质，绿色对应80万度的物质

方体，底部位于太阳表面，那里一直处在对流状态中，长方体内充满了等离子体和几乎均匀的磁场(图3(a))。如果在底部摇晃某些磁力线，这些磁力线便会变形，并产生张力，这种磁张力会施加在等离子体上，并产生沿着磁力线传播的波，这就是“阿尔文波”。

根据磁流体学理论，在物质密度高的地方，阿尔文波的传播速度慢一些，就像粗的钢琴丝振动得慢一样。当阿尔文波往上传播时，由于相邻磁力线的等离子体密度不同，阿尔文波的传播速度也不同。因此相邻磁力线上等离子体的振动并不同步(图3(b))，从而会相互摩擦，迅速耗散掉阿尔文波携带的能量。

日冕中有的磁力线是弯曲的，像个磁环，两个足点扎根于稠密的太阳表面(图3(c))。在这种情况下，为了研究方便，帕克想象着将磁力线拉直，两端固定，就像把钢琴丝固定在琴架上一样(图3(d))。当足点激发的波动频率与磁力线的本征频率一致时，磁力线就会发生共振，如图3(e)所示。

1978年，物理学家艾恩森利用

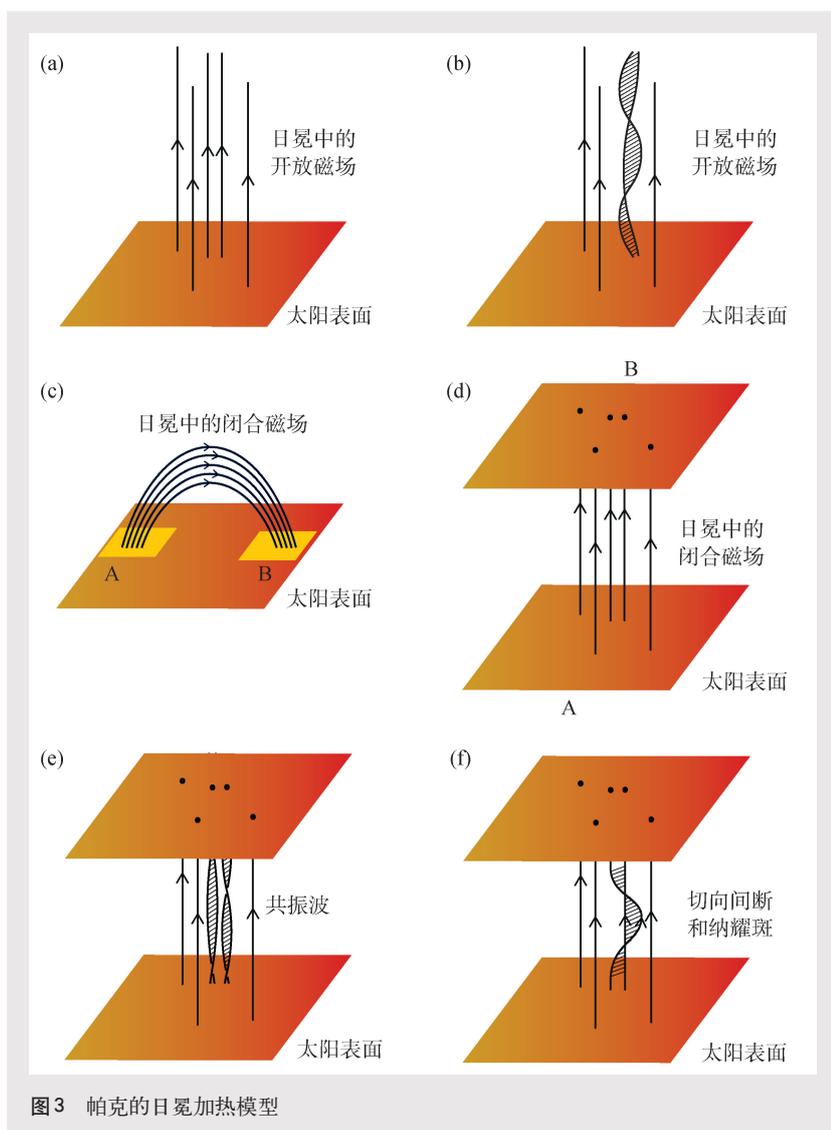


图3 帕克的日冕加热模型

图3(e)所示的物理图像对日冕加热进行了定量计算。有人可能要问,这种基于磁流体力学的方法能够描述日冕中100 m尺度下的物理过程吗?加州理工大学的戈德赖希和多伦多大学的斯瑞达认为是可行的。他们在20世纪90年代中期发表文章指出,相反传播的阿尔文波相互碰撞后产生湍流,进而将磁能从大尺度转移到能够耗散成热能的小尺度。不过,帕克注意到,太阳表面的对流运动由各种周期的振荡组成,艾恩森模型要求的振荡周期为几十秒,但观测表明对流运动主要是周期为几分钟的振荡。为了寻求

更合理的模型,帕克开始思考这样一个问题:如果磁力线的一个足点固定不动,而另一个足点缓慢摇摆或扭转后,日冕磁场演化达到的最终平衡状态是什么样子的呢?经过分析,他意外地得到了一个重要结论:在日冕的最终平衡状态中,相邻磁力线的方向会出现突变(图3(f))。

这种方向突变的磁场结构被称为“切向间断”,对应小尺度的电流片,正是它们携带着磁场的自由能。由于这些电流片的厚度不可避免地变得越来越薄,电流密度变得异常大,最终导致微观不稳定性。这样的话,无需引入宏观湍流即可

耗散掉慢慢积累的自由能。这简直是非常完美的理论。不过要小心莎士比亚式的悲剧哦:但凡完美的事物,其结局经常是死亡。

寻找纳耀斑

帕克认为,在日冕的闭合磁环中,时刻都有大量的电流片以小爆发的形式释放磁场的自由能,每次释放的能量大约是 10^{16} J,差不多是大耀斑能量的十亿分之一,帕克称之为纳耀斑。自从帕克在1988年预言纳耀斑之后,天文学家们便对此趋之若鹜。隔三差五就会有人发表文章声称自己发现了纳耀斑,解决了日冕加热问题。然而,这些爆发事件只是目前的探测能达到的极限,它们也许只是由很多目前尚无法分辨的小尺度亮结构组成的一个综合表象。

大家都期待在观测数据中发现支持某个日冕加热模型的确凿证据。然而,很可惜,现在下结论还为时过早。2000年,阿根廷的曼德里尼及其合作者发表了一篇综述文章,文中罗列了迄今为止提出来的22个日冕加热模型。他们发现目前的研究居然无法排除其中任何一个模型。用泡利的名言来说,这些模型连错误都够不上。

前沿课题

日冕加热是一个充满挑战的重大课题,年轻人要勇于迎接这个挑战。前两年发射的美国“帕克太阳探针”和欧州“环日轨道器”卫星已经开始观测,位于夏威夷的井上健太阳望远镜也很快会完成调试(译者注:中国也将在一年之内连续发射两颗太阳观测卫星),太阳物理即将迎来又一波海量观测数据,科研人员又要忙活了。