

谜团锦簇的太阳大气层

卢昌海

我们的太阳故事到这里已接近尾声了。在本节中，我们将探索太阳的最后一个组成部分：大气层。那是一个肉眼通常难以窥视的地方，但利用各种仪器的帮助及日全食的机会，天文学家们已经对它进行了颇为细致的观测。观测的结果如何呢？概括地说是四个字：谜团锦簇。事实上，在这个谜团锦簇的太阳大气层中，我们将要面对的谜团可能要比在前面各节中遇到的加起来还多。这是因为太阳大气层比太阳内部更复杂吗？未必。更有可能的原因是我们对太阳大气层的观测远比对太阳内部来得细致。有一句西方俗语说得好：魔鬼存在于细节之中，太阳大气层无疑就是一个例子。

我们在上节中已经提到过太阳大气层的某些部分。比如厚度约 500 千米的温度最低层，厚度约 2000 千米的色球层等。本节的探索将从色球层开始，因为它将带给我们第一个谜团——色球层反常高温之谜。

色球层这一名称来自希腊文词根“chromos”，含义是颜色。我们以前介绍过的太阳元素“氦”就是在色球层的光谱中被发现的。色球层的一个很引人注目的特点，就是一反太阳内部温度自核心向外逐层递减的趋势，出现了外层温度比内层更高的奇怪现象，即所谓的色球层反常高温。这种反常高温的原因是什么呢？或者更具体地说，它所需的能量从何而来呢？科学家们进行了长期研究，并提出了一些可能的机制。目前看来比较靠谱的机制主要有两种：一种是声波加热，另一种是阿尔文波加热。

声波加热顾名思义，就是认为色球层反常高温所需的能量来自于声波。太阳上的声波我们曾经介绍过，它们以太阳的肚子为谐振腔，形成很多模式，并且在被对流区顶部反射时会有一部分“漏网”，形成诸如“五分钟振荡”那样的大气层振荡现象。那么，那部分“漏网之鱼”的最终命运会如何呢？答案是：很悲惨。一般认为，色球层就是它们的葬身之地，而它们葬身之时留下的唯一“遗产”就是能量——维持色球层反常高温所需的能量。这就是所

谓的声波加热机制。不过这种机制有一个显著的缺点，那就是只在能量需求不大的色球层下部才比较有效，在真正急需能量的色球层上部却不够“给力”。计算表明，大部分声波根本没到色球层上部就“出师未捷身先卒”了。

那么色球层上部高温所需的能量又来自何方呢？一般认为，也是来自一种波，叫作“阿尔文波”。那是一种沿着下文将要介绍的太阳磁场中的所谓磁通量管传播的波，是瑞典物理学家阿尔文提出的。研究表明，这种阿尔文波可以远比声波传得更高，从而可以为色球层的上部送去“温暖”，这就是所谓的阿尔文波加热机制。不过，声波加热与阿尔文波加热这两种机制的“高低搭配”是否算是解决了色球层反常高温之谜呢？目前还没人能打保票，因为很多细节仍有待完善。

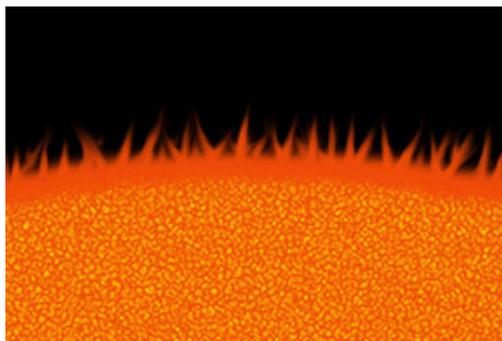


图 1 色球层中的“小火舌”——针状物

反常高温并不是色球层带给我们的唯一谜团，色球层中的另一种现象也对天文学家们提出了挑战，那就是所谓的针状物（图 1）。早在 1877 年，意大利天文学家塞奇就在色球层的边缘上发现了这种形如尖针的东西。后来的观测证实，那是一些底面积与四川省差不多大，高度相当于几百个珠穆朗玛峰的“小火舌”。这样的“小火舌”在整个色球层中通常有六七万个之多，它们的温度在一万度左右，底部物质以每秒几十千米的速度向上升腾。这些“小火舌”的成因也是一个谜团，一般认为，它们与“五分钟振荡”有着密切关系，但很多细节同样有待完善。

不过，我们对色球层的理解虽然是“缺点错误在所难免”，总体来说还算差强人意（这个词常被误用为“不能使人满意”，这次是按正确的含义来用，表示“勉强使人满意”）。与之相比，色球层以上部分的麻烦可就大多了。经过一个厚度 200 千米左右的“薄如蝉翼”的过渡区，太阳大气层的温度剧增到了 100 万度以上。那里便是日全食相片中最吸引眼球的东西——日冕。日冕这一名称的希腊文词根表示的是王冠。我们小时候画太阳时，通常会画上一些象征阳光的锯齿状轮廓，日冕就有点像那轮廓，只是形状要复杂得多。日冕不仅形状复杂，其他方面也很复杂，比如它的密度分布极不均匀，有些地方甚至有巨大的空洞，称为“冕洞”；它的温度分布也同样极不均匀，平均为 100 万~300 万度，局部的低温和高温则比比皆是。

日冕给天文学家们带来的谜团是显而易见的，那就是它为什么会有如此高的温度？这个谜团与色球层的反常高温之谜如出一辙，“难度系数”却高得多。因为声波与阿尔文波这两种为色球层送去“温暖”的加热机制，对于“高高在上”的日冕来说，都显得有些“力不从心”。这其中声波加热机制连色球层上部都难以到达，自然就甬提了。阿尔文波的情况要强一些，它能为日冕提供一部分能量，但数量却不够。因此，解决日冕高温之谜还需要有其他机制的加盟，这其中比较有希望的一种机制，是美国天体物理学家帕克在 1988 年提出的所谓“纤耀斑”加热机制。按照这种机制，日冕中常常会发生微型爆炸，即所谓的“纤耀斑”，这是我们将在下文中介绍的耀斑的“迷你版”，威力“仅”相当于几百个氢弹，数量却很频繁，足以为日冕送去大量“温暖”，甚至有可能是日冕能量的主要来源。当然，这后一点目前谁也说不准。一般认为，太阳上不同规模耀斑的数量分布与自然界的很多其他随机现象一样，近似地满足所谓的幂律分布（即数量与规模之间满足近似的幂函数关系）。按照这种分布，“纤耀斑”的存在是不成问题的，数量也应该是比较大的，但是否大到能为日冕提供足够能量的程度，则与幂律的幂值有关，人们对之尚有争议。纤耀斑加热机制如此，其他机制的情况也大致相若，各有各的争议之处。那些争议不解决，日冕的高温之谜当然也就无法解决。

日冕不仅温度极高，体积也极为庞大。看过日

冕相片的读者想必都对日冕的体积留有深刻印象。从相片上看，日冕有时能延伸到几个太阳半径处，其体积之大甚至超过了太阳本身。与地球大气层（厚度约 100 千米）的体积仅为地球体积的百分之几相比，日冕的体积无论绝对值还是相对值都是极为巨大的。但这是否就是太阳大气层的边缘呢？答案是否定的。事实上，早在 20 世纪 50 年代中期，英国天文学家查普曼就曾提出，日冕虽然看上去只延伸到几个太阳半径处，但如此高温的气体是不可能被禁锢在那样“小”的范围之内的。据他估计，日冕应该能一直延伸到地球轨道以外。

与查普曼这一看法的提出几乎同时，德国天文学家比尔曼也提出了一个与太阳外围有关的想法，那就是我们如今称之为太阳风的想法。比尔曼的想法源于一个众所周知的现象，即彗星的尾巴——彗尾——总是沿背离太阳的方向伸展的，哪怕当彗星本身背离太阳运动时也是如此，仿佛是被一股来自太阳的“风”吹起来的。

查普曼与比尔曼的想法看起来很不相同，在空间范围上却存在巨大的重叠，它们彼此间是否有关联呢？上文提到过的美国天体物理学家帕克作出了肯定的回答。他的研究表明日冕不可能是一团宏观上静止的弥散气体，而应该是一种向外运动的“气流”——即“太阳风”。这样他就把查普曼的巨型日冕与比尔曼的太阳风联系起来，他并且为太阳风构筑了一个具体的模型。有意思的是，帕克这项如今被视为太阳风研究的开山之作的重要研究，在当年却遭到了审稿人的拒绝，后来亏得著名美籍印度裔天体物理学家钱德拉塞卡的慧眼相识，才得以发表。

有关太阳风的猜测很快就得到了观测证实。自 20 世纪 50 年代末起，苏联的“月球”系列航天器，“金星一号”行星探测器，以及美国的“水手二号”行星探测器都先后观测到了太阳风。如今我们知道，太阳风是太阳大气层外围的一种相当显著的现象，每秒钟从太阳上带走将近 200 万吨的物质。当然，这一乍看起来很惊人的数量相对于太阳的巨大质量来说只是“毛毛雨”。太阳风除了造成彗尾的“轻舞飞扬”外，更显著的结果是在太阳周围的星际介质中“吹泡泡”，被它吹出的泡泡称为“日球层”，其边缘通常被广义地视为是太阳大气层的边缘。那么这个边缘究竟在哪里呢？一般认为，是在离太阳

100~200 天文单位（即 150 亿~300 亿千米）处。这个距离远远超过了所有太阳系已知行星的轨道半径，因此从某种意义上讲，我们一直都生活在太阳的大气层中——不仅我们如此，所有已知的太阳系行星都是如此，真所谓“普天之下，莫非王土”。

作为谜团锦簇的太阳大气层的成员，色球层和日冕都给天文学家们出了难题，太阳风也不例外。迄今为止，人们尚未找到一个能全面描述太阳风特征的模型。观测表明，太阳风的“风速”约在每秒 200~800 千米之间。其中“风速”在每秒 400 千米以下的被称为慢太阳风，“风速”在每秒 400 千米以上的则被称为快太阳风。太阳风模型必须解释，却迄今尚不能给出满意解释的一个老大难问题，就是这两者，尤其是快太阳风的起源。一般认为，快太阳风粒子的起源需要一个合适的加速机制，这种机制与日冕的加热机制很可能存在密切关系，甚至有可能是同源的（比如阿尔文波有可能对两者都起着重要作用），但具体如何，还有待进一步研究。

以上就是对太阳大气层各主要成员的大致罗列。如果小结一下的话，那么太阳大气层底部有一个很“凉快”薄层叫做温度最低层，自那以上温度不降反升，在温度不算太高的色球层中，有几万个底面积“只有”四川省那么大，高度“只有”珠穆朗玛峰的几百倍那么高的“小火舌”。在那以上，经过一个“薄如蝉翼”的过渡区，是体积大得惊人的日冕，那里的物质极度稀薄，温度却高得邪乎，还时不时地有几百个氢弹炸来炸去。再往外，则是以比火箭还快几十倍的速度劲吹到几百亿千米外的太阳风。这就是太阳大气层的日常景观，这种景观有一个很文雅的名称，叫做“宁静太阳”——别揉眼睛，您没看错，是叫做“宁静太阳”。

“宁静”的意思就是没什么“活动”。“宁静”时尚且如此，那么有“活动”时又会怎样呢？

太阳大气层中的各种“活动”有一个很没创意的共同名字，就叫“太阳活动”。在太阳活动中，资格最老的是黑子（图 2）。早在两千多年前，中国古籍中就出现了有关黑子的记载，西方人记载黑子也有一千多年的历史。不过黑子的发现虽早，长期以来却很少有人认清它的真面目，而常常把它当成所谓的行星凌日，即行星从太阳前面经过。直到 17 世纪初，才由伽利略明确提出黑子是太阳自身的“污点”。这个看似稀松平常的结论，对当时的“天贵地

贱”观念给予了当头一击。不仅如此，这一结论还给另外一些人造成了困扰，比如我们在前文中提到过的英国天文学家赫歇耳，就曾被黑子的“黑色”所误导，而以为太阳表面很凉快，甚至有可能存在生物。

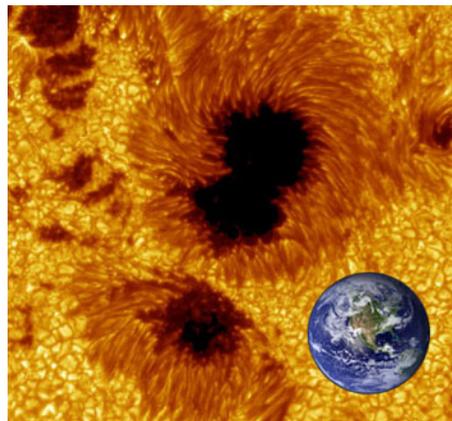


图 2 太阳黑子(右下角的对照物为地球)

那么这个蒙蔽了大伙儿几百年，甚至把赫歇耳那样的著名前辈都给误导了的黑子到底是什么东西？它为什么会出现在光芒万丈的太阳上呢？这些谜团直到 20 世纪初才逐渐揭开面纱。首先被搞清楚的是，黑子展现的绝不是赫歇耳所幻想的有可能有生物栖息的凉快表面，它的温度实际上高达 4000 度左右，足以熔化素以耐高温著称的金属元素“钨”。黑子之所以呈现黑色，完全是因为它不幸生在了一个比它更“白”的环境里（黑子周围太阳物质的温度比它高了一千多度），从而被衬黑了。如果我们能将黑子周围的阳光全部滤掉的话，黑子非但不黑，反而会呈现出耀眼的光芒。另外，黑子看上去很小（黑子的英文名字中的“spot”和中文名字中的“子”都有“小”的意思），那也只是相对于太阳的庞大而言的，它的实际块头可不小，即便小黑子的面积也有新疆那么大，大黑子更是可以吞下整个地球。

黑子的“黑”和“小”这两个品性算是被搞清楚了，但它为什么能“出高温而不染”，维持这么“低”的温度呢？这可就不是一个简单问题了。它所牵扯到的是太阳大气层中最重要的幕后推手：太阳磁场。

1908 年，美国天文学家黑尔通过光谱学手段发现，黑子中存在强度约为 0.3 特斯拉的磁场。这是很强的磁场，比地球磁场强一万倍左右，也比太阳表面的平均磁场强得多。这一强磁场的存在为揭开黑子的“维稳”之谜提供了线索。这线索就是：“维

稳”离不开“警力”，而磁场恰恰可以充当这种“警力”，因为它会产生一种特殊的压强，叫做磁场压。正是在磁场压的帮助下，温度较低（从而内部压强也较低）的黑子才能抗衡住外部物质的高压而维持稳定（黑子一般能维持几天至几星期，在太阳大气层中算是比较稳定的结构）。进一步的计算还表明，强磁场对太阳物质的对流会产生抑制作用，使得能量无法经由对流有效地传至黑子内部，这就解释了黑子温度偏低的原因。更令人欣慰的是，在理论上还可以证明，太阳物质的运动会通过一种所谓的“对流坍塌”现象，而自发地造成某些区域的磁场强度增加。这种磁场强度增加的区域通常呈管状分布，被称为“磁通量管”。磁通量管伸出或插回太阳表面的地方通常就会形成黑子。由此可见，磁场的存在除了能解释黑子的主要特征及“维稳”机制外，还可以解释它成因。不仅如此，由于磁通量管的伸出与插回总是“成双成对”，且极性相反的，它还可以解释有关黑子整体分布的一个重要特征，那就是黑子常常成对出现，且每对黑子的磁场极性彼此相反。

但是，磁场的存在虽然解释了黑子的成因、主要特征及“维稳”机制，却不等于说黑子就没有带给我们其他谜团了，那样的谜团其实还不少。细致的观测表明，黑子有着复杂的结构，除了被称为“本影”的黑色中央区域外，半径在 5000 千米以上的大黑子四周通常还有所谓的“半影”，它们的颜色较浅，包含了很多纤维状结构。更仔细的观测还表明，本影中有时会出现亮点，半影内则有时会出现漩涡状结构，在黑子消亡前，本影内有时还会出现明亮的桥状结构。这些细致结构的成因及演化目前都还是有待探索的谜团。

太阳活动的另一个重要成员叫作耀斑（图 3）。如果说黑子是一种很低调的太阳活动，那么耀斑就恰好相反，它极为张扬，是“爆炸式”的活动——这可不是比喻，因为它实际上就是爆炸。一个大耀斑通常可以释放出几十亿亿焦耳的能量，相当于一百亿个百万吨级氢弹同时爆炸！在大耀斑爆发时，太阳大气层的局部温度可以在短时间内升高到 2000 万~3000 万度，比太阳核心的温度还高。耀斑的威力极为惊人，虽然发生在一亿五千万千米之外的太阳上，却足以对地球产生显著影响。事实上，1859 年 9 月，人类记录下的第一个大耀斑就是以它对地球的显著影响引起人们的注意的，它所发射的带电

粒子流猛烈撞击地球磁场，产生的极光一直延伸到赤道附近，使无数没有机会前往极地的人领略了一次天象奇观。随着技术的发展，耀斑对地球的影响得到了越来越多的显现机会。1984 年 4 月，一个普通耀斑中断了美国总统里根的“空军一号”专机与地面的通信，使美国情报部门大为紧张，以为是苏联人在做手脚。2006 年 12 月，一个小耀斑将正在进行舱外作业的国际空间站的宇航员逼入“发现者”号航天飞机仓惶躲避（他们实际上还是慢了一步，所幸那只是小耀斑，他们所受的辐射剂量不大）。

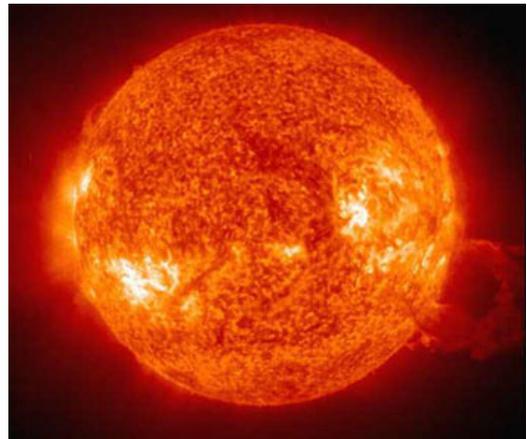


图 3 太阳耀斑

耀斑给我们提出的问题是显而易见的：那就是它为什么会发生？它的能量来自何方？科学家们对这些问题进行了长期研究。与黑子一样，一般认为耀斑的发生也跟太阳磁场有着密切关系。一种目前比较流行的观点认为，耀斑的发生很可能是磁通量管的重组造成的。太阳上的磁通量管就像橡皮筋一样，可以通过应力等形式储存能量（上文提到的阿尔文波之所以能沿磁通量管传播，也正是因为这一特性）。随着太阳物质永不停息的运动，磁通量管会被拉伸、扭曲、缠绕，这些过程会大大增加储存在磁通量管中的能量。但这种过程是不可能永远持续下去的，因为能量越高的状态就越不稳定，最终将会有一个时刻，如同橡皮筋突然断裂一样，磁通量管发生重组，由拉伸、扭曲、缠绕后的复杂状态一举重组回相对简单的状态，并将因拉伸、扭曲、缠绕而储存起来的能量在很短的时间内释放出来，由此形成的就是耀斑。这个过程有点像小孩搭积木，随着积木越搭越高，势能越积越多，它会变得越来越不稳定，最终会有一个时刻，积木突然垮塌，原先

储存在积木中的势能突然释放出来（释放的形式之一就是撞击桌面或地面发出的轰然之声）。

这种机制得到了一定程度的观测支持。人们发现，耀斑通常发生在极性变化较为复杂的黑子区域附近，那里不仅有强磁场，而且磁通量管的分布较为复杂，容易发生上述机制所要求的拉伸、扭曲、缠绕等过程。但这种机制也并非没有问题。比如前面提到的帕克在 20 世纪 60 年代曾对磁通量管的重组进行过估算，结果发现那需要几小时甚至几天的时间才能完成，而耀斑的能量释放过程往往持续不到一分钟，两者大相径庭。为了解决这一问题，科学家们提出了许多修正方案，比如有人提出磁通量管的重组只需发生在一小段而不是整段上，从而能在短得多的时间内完成。也有人提出磁通量管在重组前会破碎成许多小圈，从而大大增加接触面积，使重组得以“提速”，等等。总之，方案人人会提，各有巧妙不同，但越是巧妙的方案所需的观测证实通常也越精密，其中很多都超出了目前的观测能力，因此耀斑的发生机制到目前为止还是一个谜，探索的道路还很漫长。

除耀斑外，太阳大气层中的另一种爆发现象近来也受到了越来越多的关注，那就是所谓的日冕物质抛射。一定规模的日冕物质抛射的发生频率从几天一次到一天几次不等，它们与耀斑的主要差别，顾名思义是会抛射出大量的“物质”，主要是带电粒子，数量约有几十亿至上百亿吨，飞行速度约为每秒几百千米，所携带的动能与大耀斑的总能量相近。这些质量相当于几万艘万吨巨轮的带电物质若不幸与地球相遇，将会造成大型的地磁暴，其威力往往要比耀斑造成的地磁暴更厉害——这也正是人们越来越关注日冕物质抛射的主要原因。

1989 年 3 月，一次小规模日冕物质抛射引发的地磁暴，造成了加拿大魁北克省电力系统的崩溃，并使得极光范围一直延伸到美国南部的德克萨斯州，很多人甚至担心美苏双方的军事通信系统会因地磁暴的干扰而触发核大战。小规模日冕物质抛射尚且如此厉害，大规模日冕物质抛射倘若击中地球，结果更是不堪设想。2009 年 5 月，美国国家海洋与大气管理局发布了一份太阳风暴警报，认为 2013 年有可能会是太阳活动较频繁的年份，其中某些太阳活动的规模有可能不在 1859 年那次大耀斑之下。这其中最令人担忧的就是大规模日冕物质抛射击中

地球的可能性。有人也许会说：1859 年的大耀斑不就是一次天象奇观吗？并没有造成严重后果啊？是的，1859 年的大耀斑确实没有造成严重后果，但今天的人类社会早已不是 1859 年那样子了。我们今天引以为傲的现代文明已经极大地依赖于各种各样的电子及电力设备。在这种情况下若被大规模日冕物质抛射所击中，后果将远不是天象奇观那么浪漫，而很可能是灾难性的，比如很可能出现全球性的电力中断（图 4）。现代社会是如此彻底地依赖电力，就连像加油站那样以提供其他能源为目的的系统，也已经离不开电力。一旦发生全球性的电力中断，后果将不堪设想，那时想要修复哪怕一座爆炸了的变压器都会极度困难。科学家们估计，那样的灾难倘若发生，人类恐怕要用几年的时间才能逐渐恢复，在此期间，连食物和水的供应都会出现困难，其结果将是比任何大型战争或重大瘟疫还要可怕得多的生命损失，就连发达国家也难以幸免（事实上，在那样的灾难面前，发达国家反而有可能更脆弱，因为它们比其他国家更依赖于电子及电力设备）。



图 4 太阳风暴假想图

当然，这只是最坏情形，即便真的发生大规模日冕物质抛射，它直接击中地球的概率也并不大，但想到人类只能仰仗大自然的恩赐来侥幸度日，毕竟是一种很无奈的感觉。太阳对于我们实在太重要了，为今后有可能发生的来自于太阳的灾难预作准备，是除好奇心之外，人类研究太阳的一个最重要的动机。事实上，最近几年来，人们已经开始建立所谓的“太空气象”系统，试图对主要由太阳活动引起的地球附近的空间环境变化进行研究及预测，以服务于我们这个脆弱星球上的脆弱系统。但到目前为止，此类系统尚不能作出真正意义上的预测（比如前面提到的美国国家海洋与大气管理局

有关 2013 年太阳风暴的警报,就完全有可能是错误的)。它所能做的真正可靠的事情,只是利用带电粒子从太阳运动到地球所需的几天时间,通过已经发生的太阳活动,来为我们提供几天的预警时间而已。

那么,日冕物质抛射是如何发生的呢?很不幸,这也是一个未解之谜。人们提出了很多理论,但各有各的问题。比如很多人曾经认为,日冕物质抛射与耀斑有着直接关联,甚至完全就是由耀斑造成的。但后来的研究发现,很多大耀斑并不导致日冕物质抛射,而某些小规模日冕物质抛射则似乎没有与之相伴的耀斑。因此日冕物质抛射与耀斑之间看来并不存在可靠的因果关联。但一般认为,两者之间虽没有因果关联,却也绝非毫不相干。佐证这一点的最好证据,就是几乎所有大规模的日冕物质抛射都有与之相伴的耀斑。另外,日冕物质抛射与耀斑一样,都几乎铁定是与太阳磁场存在极密切的关系,而且极有可能都是磁通量管的重组造成的(事实上,日冕物质抛射很可能是整段磁通量管遭到“抛弃”所致)。只不过究竟什么样的磁通量管分布会造成耀斑,什么样的磁通量管分布会造成日冕物质抛射,目前还不得而知。

从黑子到耀斑,再到日冕物质抛射,太阳活动的形式是丰富多彩的。那么,在这些活动中有没有什么共同特征呢?有,那就是太阳周期,那也是我们在结束走马观花般的本节前,最后要介绍的话题。

太阳周期是德国天文学家施瓦布通过对太阳黑子数目长达 17 年的持续观测,并借鉴历史数据所发现的(图 5)。它最初的含义是黑子数目的变化周期。但后来的研究发现它同时也影响着耀斑、日冕物质抛射等其他太阳活动,甚至对太阳的光度及太阳风的强弱也有一定影响,可以说是所有太阳活动的共同特征。另一方面,在揭示出太阳周期所具有的广泛影响力的同时,它作为周期现象的品质却在下降。现代观测表明,太阳周期并不是严格意义下的周期现象,它的平均值约为 11 年,但有时可以短至 9 年,有时又可以长达 16 年,甚至还出现过长达几十年没有显著活动的所谓“蒙德极小期”。不过,尽管有这样的起伏,太阳活动的规律性仍是足够显著的,起码存在着近似意义上的周期性,而绝不是随机现象。在一个太阳周期中,太阳活动最少的年份称为太阳活动极小年,太阳活动最多的年份则称为太阳活动极大年。前面提到的美国国家海洋与大气管理

局有关太阳风暴的警告,其实就是对太阳活动极大年的预测,即认为 2013 年很可能是即将来临的一个太阳活动极大年。

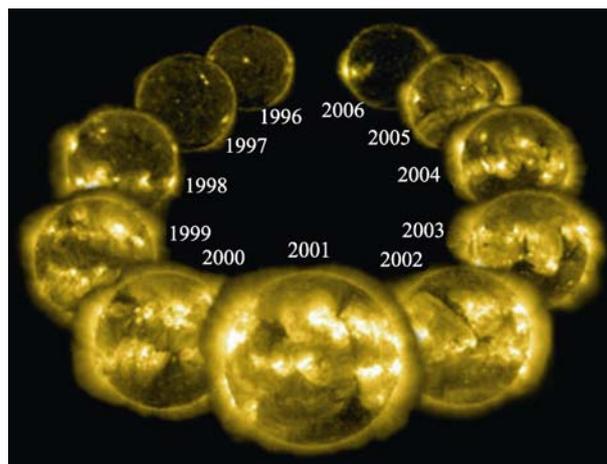


图 5 太阳周期(顶端为极小年,底部为极大年)

尽管太阳周期不是严格意义下的周期,但作为一种显著的近似现象,它的存在依然是需要解释的。为了寻找这种解释,科学家们付出几十年的艰辛努力,可惜的是——读者们一定猜到我要说什么了——迄今为止这也仍是一个未解之谜。

当然,这并不是说几十年的努力毫无成果。相反,成果不仅有,而且还还不小。在这里我们介绍其中较受青睐的一个,即所谓的“发电机机制”。在介绍之前,首先让我们一同分析一下,解释太阳周期的切入点应该在哪里?大家请不要拍砖,这并不是拿一个研究性的问题来卖弄知识或为难读者。事实上,对太阳周期的具体解释虽然是极困难的研究课题,切入点的选择却是相当显而易见的。通过本节的介绍,我们已经知道太阳活动有一个共同的幕后推手,那就是太阳磁场。而我们前面刚刚介绍过,太阳周期是所有太阳活动的共同特征。既然一组现象有一个共同的幕后推手,那么它们的共同特征最有可能归因于什么呢?当然就是那个共同推手,即太阳磁场。因此,解释太阳周期的切入点应该是太阳磁场,这也正是发电机机制的切入点。发电机机制的精髓之处,就是将太阳磁场本身的演化也纳入了解释范围之内,从而在很大程度上具有统领整个领域的潜力。

发电机机制出现于 20 世纪 60 年代,此后经历了几次起落。它的早期设想是这样的:在太阳活动的极小年中,太阳内部存在着弱磁场(像太阳这样

的巨型等离子气团中存在弱磁场并不是难以想象的事情，不存在反倒是难以想象的)。这种场在太阳内部主要由南极指向北极，被称为极向场。极向场在太阳内部自转不均匀性的带动下，将会发生扭曲，使磁通量管沿赤道方向遭到拉伸，形成所谓的环形场。随着扭曲的加剧，环形场的强度会持续增强。计算表明，当环形场的强度增加到一定程度时，磁通量管将会出现上浮的现象。不仅如此，磁通量管在上浮过程中还会产生新的极向场，从而构成极向场与环形场之间的相互支撑。当磁通量管浮出太阳表面时，将如上文说过的那样，在伸出和插回太阳表面的地方形成一对磁场极性相反的黑子。粗略的分析表明，这种机制有一个很漂亮的地方，那就是可以解释有关黑子分布的所谓斯波勒定律，即在每个太阳周期中，自极小年到极大年，太阳黑子几乎总是首先出现在高纬度区域，然后向低纬度区域扩张，而且南北半球上的黑子对有着相反的极性。那么太阳周期又是如何出现的呢？是因为磁通量管的相互湮灭。当南北半球那些极性相反的黑子对扩张到赤道附近时，磁场方向相反的磁通量管会相互湮灭，从而使磁场分布逐渐回到最初时的弱磁场状态——这就是一个新周期的开始。

这些结果初看起来很令人振奋，不仅对太阳周期作出了说明，还附送了对斯波勒定律的解释，简直是“买一送一”。可惜好景不长，问题很快就出现了，而且恰恰就出在那附送的部分上。原来，发电机机制的早期研究有一个先天不足，那就是对太阳内部的自转状况一无所知。当然，在那种早期研究中，无知有无知的快乐，那就是便于作假设，因此当时人们对太阳内部的自转状况作了相当任意的假设，目的之一就是解释斯波勒定律。但不久之后，我们上节所介绍的日震学手段就粉墨登场了，它无情地粉碎了那些无知年代的快乐假设，因为它所探测到的太阳内部的实际自转状态与早期所假设的并不一致。那么，利用太阳内部的实际自转状态是不是仍能解释斯波勒定律呢？很遗憾，不能。事实上，它很不幸地会导致黑子分布规律的逆转，即变成了从低纬度向高纬度扩张，与斯波勒定律恰好相反。这样一来，原先“买一送一”的友情馈赠反倒变成了躲都躲不开的“硬性搭售”。更麻烦的是，早期发电机机制被认为是在对流区中起作用的，新的研究却发现，太阳对流区的环境过于恶劣，到处是强劲的湍

流。在那样的环境下，磁通量管很快就会被撕碎，从而根本就不可能有时间来孕育足够强的磁场。这样一来，发电机机制连对流区这一“老巢”都失守了。

这些问题给发电机机制蒙上了巨大的阴影。但天文学家们没有放弃，而是积极寻找着解决之道。到了20世纪90年代中期，一种新设想为发电机机制注入了新活力。这种新设想就是“迁居”——将发电机机制的作用地点由对流区迁移到差旋层中。差旋层我们在上节末尾曾经提到过，它是对流区底部以下的一个薄层，是太阳刚性自转与非刚性自转的交界层。这样的交界层自然也会造成极向场的扭曲，从而也可以启动发电机机制。但与对流区不同的是，差旋层由于地处对流区底部以下，因而是一个相对稳定的地方，发电机机制可以在那里从容不迫地积累强磁场。不仅如此，计算表明，这种新设想所导致的黑子分布规律与斯波勒定律又重新一致了，从而排除了一个重大硬伤，使局势进一步明朗起来。不过硬伤虽已被排除，软伤的有无却是谁也无法打包票。发电机机制作为一个非线性模型，存在着诸如混沌之类的复杂性，而太阳周期本身也是一种复杂现象，这两者的拟合在细节上几乎无可避免地存在很大的不确定性，使得谁也无法保证目前这明朗局势是否是昙花一现，甚至只是回光返照。我们只能说发电机机制是迄今为止有关太阳磁场及太阳周期的比较有希望的机制。

作者简介

卢昌海，本科毕业于上海复旦大学物理系，后赴纽约哥伦比亚大学从事理论物理学习及研究，并获物理学博士学位。现旅居纽约。个人主页：<http://www.changhai.org>

