

太阳的故事——日食

卢昌海

美国科幻小说家阿西莫夫曾经写过一个著名的科幻故事，叫做“黄昏”。在这个被许多读者推举为有史以来最优秀科幻作品之一的名篇中，阿西莫夫虚构了一个由六个太阳组成的多星系统，在那里有一个有“人”栖居的行星上，几乎任何时候都至少有一个太阳悬在空中，夜幕每隔 2049 年才会降临一次。每当那一时刻来临，地平线上硕果仅存的一个太阳会遭遇“日全食”，传说中能夺人魂魄、让人丧失理智，进而毁灭整个文明世界的星星会出现在黑暗天空里。所有人都在短时间内陷入巨大的恐慌和骚乱之中，周而复始地将星星毁灭文明世界的传说变为现实。

我们很幸运，没有生活在那样的多星系统中。只有一个太阳的我们早已习惯了日夜的交替，星星在我们眼里非但不是毁灭文明世界的恐怖象征，反而是一种魅力无穷的美景（从这个意义上讲，它倒也是能夺人魂魄的）。不过，即便对于我们来说，如果太阳在原本应该出现的时候突然消失，或其圆面出现破缺，依然是一件非同小可的事情。在这种被称为日食的自然现象中，最扣人心弦的就是阿西莫夫故事中提到的日全食（图 1）。当太阳即将被全部遮盖时，月球的巨大阴影自西向东掠过地面，夜幕骤然降临，星星重新闪耀，有时还能看见美轮美奂的贝利珠和壮丽的日冕。这时候，有些人将会感到颤栗——不是因为害怕，而是由于气温的骤降。在日全食的短暂过程中，气温会有相当明显的降低（比如 1878 年 7 月 29 日的日全食期间，美国丹佛市的气温从酷热的 46°C 骤降到 28°C ）。这种笼罩整个天空和大地的大自然的华丽演出，对亲临者来说往往是令人陶醉和终生难忘的。

不过这只是现代。在古代，日食的出现可不是什么轻松的事情（虽然有时也能导致好结果）。古希腊历史学家希罗多德曾经记载过公元前六世纪米底斯与利底亚两族交战时，因遭遇日食致使双方惊恐万分、终止干戈的事情。这样的事情在历史上发生过多次，甚至直到 20 世纪 60 年代，柬埔寨内阁首相朗诺的军队还在一次战斗中因遭遇日全食而惊慌失措。

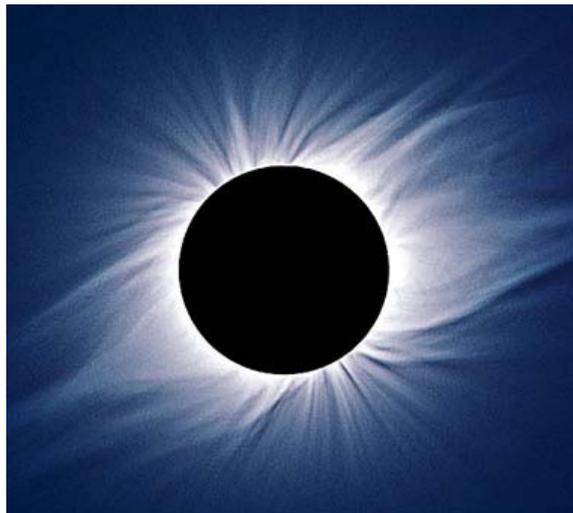


图 1 日全食

在对日食成因缺乏了解的古代，人们对日食有过许多荒诞不经的猜测。我们熟悉的“天狗吃太阳”就是其中之一。为了吓阻天狗的“暴行”，民众常常敲锣打鼓、鸣金放炮，甚至连九五之尊的皇帝也往往要吃素斋、避正殿，诚惶诚恐。类似于“天狗吃太阳”的传说在其他古文明也有，只是所涉及的猛兽不尽相同，吞吃太阳的原因五花八门而已。最搞笑的或许是印度的一种传说，该传说认为太阳常常向某个野蛮部落的成员借钱，却借而不还。对方一怒之下就会吃掉它（但吃完后又吐出来，看来还是惦记着还钱的事情）。这种猛兽（或猛人）吃太阳的说法并不是古人对日食成因的唯一猜测。比这种“猛兽说”更有情趣的是所谓的“夫妻说”。那种说法也是形形色色，比如在某日耳曼传说中，月亮和太阳是一对不和睦的夫妻，而且太阳是妻子，当月亮偶尔去看望太阳时就会出现日食，但它们和睦不了几分钟就又会闹翻（幸亏如此），于是太阳就会重新出现。当然，也有些传说不那么“诬蔑”太阳和月亮的关系，比如在北美某印地安部落的传说中，太阳和月亮是恩爱夫妻，日食的成因——猜得到算你有本事——是太阳的手臂上抱着他们的孩子！

这些荒诞不经的传说，以及视日食为恐怖天象的年代对于生活在现代文明社会中的人来说已经很遥远了。对现代人来说，有幸观赏到日食，非但没

什么恐怖，反而是令人羡慕的经历。有些天文爱好者甚至不惜破费，千里迢迢赶往日食带观赏日食。有些天文学家更是甘当现代“夸父”，乘坐喷气式飞机追逐日食，目的就是让这一天象的持续时间尽可能延长。我们早已知道，日食并不神秘，它只不过是月球偶尔跑到地球和太阳之间，挡住了阳光而已。

明白了这个浅显的道理，我们就可以冒充天文学家来分析一下日食的规律。我们知道，月球每个“月”都会绕地球转一圈。既然是转一圈，那就总会经过太阳的方向。这么推算起来，日食似乎每个月都应该发生一次，每个世纪则应该有 1238 次（请读者想一想，为什么不是 1200 次？）。但事实上，在已经过去的 20 世纪中，总共只发生过 228 次日食。在 21 世纪中，也将只会有 224 次日食，只占 1238 次的 18% 左右。

看来天文学家不是那么容易冒充的，我们先得搞明白：那另外 82% 的日食哪里去了？

答案是：被地球漏掉了。要解释这一点，我们需要对地球和月球公转轨道的特点有一个简单了解。这其中对日食来说最重要的特点，是地球和月球的公转轨道并不在同一平面上，而是有一个平均为 5.14° 的夹角。由于这个夹角的存在，即使月球位于地球和太阳之间，它相对于地球公转轨道平面来说，也往往不是偏上，就是偏下，它的影子多数时候只能投射在清冷的虚空之中，而无法触及地球，从而无法形成日食（图 2 中左、右两侧的情形就是如此）。

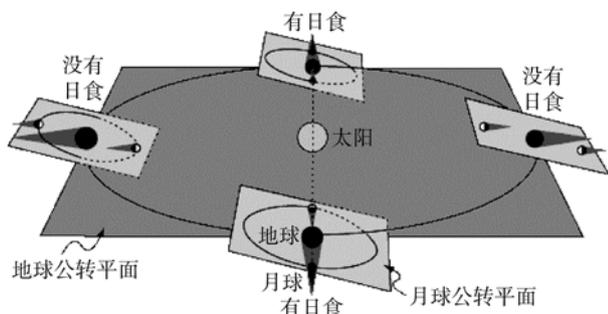


图 2 地球、月球的公转轨道与日食

那么什么时候才会有日食呢？显然只有当月球不仅位于地球和太阳之间，而且还恰好离地球公转轨道平面不远时。由于整个月球公转轨道（作为一个椭圆）与地球公转轨道平面的交点只有两个，因此月球只有运动到地球和太阳之间，并且又恰好在这两个交点之一的附近时，才能形成日食。在天文学上，这两个交点有自己的名字，视月球自南向北

还是自北向南穿越地球公转平面而定，分别被称为升交点和降交点，两者的联线则被称为交点线。用这种术语，形成日食的条件也可以表述为：月球运动到地球和太阳之间，并且交点线与太阳方向几乎重合（这保证了月球在两个交点之一的附近）。从图 2 中不难看到，交点线与太阳方向几乎重合的情形在整个地球公转周期上只会出现在两个时段里（即图 2 中两个“有日食”的位置附近），因此日食的发生并非每月一次，而似乎是每年只有两次。

如果每年有两次日食的话，一个世纪就是 200 次。这与前面提到的次数接近了不少，但仍有偏差，可见在日食的频率中还隐藏了别的玄机。这玄机之一就在于月球的公转轨道并不是固定不变的。受主要来自太阳的引力摄动影响，月球的公转轨道平面在不断改变着方位，由此导致的结果是交点线会缓慢转动，这种转动的方向与地球公转的方向相反，周期约为 18.61 年，被称为交点的退行。如果不存在交点的退行，交点线将每隔半年与太阳方向重合一次，日食将会有规律地出现在每年年历的固定时段中，它在历史上的神秘感也将褪去不少。但由于存在交点的退行，日食的出现时间就变得有些扑朔迷离了。因为交点线离开太阳方向后，无需经过半年，就会由于自己的转动而提前与太阳方向再次重合。简单的计算表明，这之间的间隔只有 173.3 天。两次这样的间隔则是 346.6 天，这被称为交点年或食年，这个时间单位在分析日食时有着重要作用。

由于每个食年都包含了交点线与太阳方向的两次重合，而“食年”的长度（346.6 天）只有“年”（365.24 天）的 95% 左右。这么推算起来，每个世纪包含了 105 个食年，而日食的次数则应该是 210 次。这比前面的 200 次又进了一步，但仍比实际次数来得少，这又是怎么回事呢？这次的答案更加微妙，但关键之处却已蕴涵在前文的措辞之中。我们在前面提到，日食发生的条件是月球运动到地球和太阳之间，并且又恰好在这两个交点之一的附近。这里的“附近”二字十分关键。为什么是“附近”而不必正好在交点上呢？一个主要的原因是因为地球是一个庞然大物。这就好比用一只很大的箩筐去兜别人扔过来的东西，东西哪怕扔歪一点，也照样能兜到。日食的形成也一样，由于地球很大，月球即使偏离交点，只要偏得不太过分，影子就仍能投射到地球上，从而形成日食。那么，多大的偏离才不

过分呢？计算表明，只要偏离 15.35° 以内，就能确保日食；如果偏离在 9.92° 之内，则不仅能确保日食，而且还能确保日全食；甚至当偏离在 15.35° 以外，但在 18.52° 之内时，仍有一定的可能性会发生日食（这时是否发生日食将取决于月球及太阳离地球的远近等因素），这个允许偏离的最大范围所对应的时段被称为食季。

由于偏离可以发生在交点的任何一侧，因此食季的角度范围是 18.52° 的两倍，即 37° 左右。在地球绕太阳的公转中，走过这样一个角度范围所需的时间约为 37 天，这就是食季的长度。由于这个长度比一个“月”来得长，因此在一个食季中，至少会发生一次日食。运气好的话，月球有可能会两次经过能形成日食的位置，这样我们就能看到两次日食。比如即将到来的 2011 年的 6 月 1 日和 7 月 1 日这两个同属一个食季的日子就都将出现日偏食（可惜中国不在那两次日食的日食带上）。由于在一个食季中有一定的可能性出现两次日食，因此每个世纪的日食次数要比食季本身的数量略多，而且各个世纪的日食次数不尽相同。

现在让我们来介绍一些更精确的规律。我们已经知道，日食的发生是因为月球遮挡了太阳。很明显，这时的月相必定是新月（因为太阳在月球的正后方）。因此，日食发生的粗略条件虽然取决于食年和食季，确切日期却是由新月决定的（读者如果想要推算日食的时间，这一点是很重要的）。在太阳、地球和月球这一系统中，非常巧合的是：19 个食年几乎恰好等于 223 个朔望月——两者都很接近 6585 天。这说明与任何一次日食相隔 6585 天，就几乎铁定会有另外一次日食。更巧合的是，月球每两次经过近地点（或远地点）的时间间隔——即所谓的近点月——为 27.55455 天，239 个近点月也几乎恰好就是 6585 天。由于近点月描述的是月地距离——从而也是月球的角直径——的变化周期，而月球的角直径是影响日食种类及持续时间的重要因素（因为月球的角直径越大，就越容易形成日全食，而且能遮挡太阳的时间也就越长）。因此 6585 天是食年、朔望月和近点月的共同倍数这一巧合，意味着每隔 6585 天，与日食有关的太阳、地球和月球的各种位置参数都几乎恰好彼此相同，由此导致的结果是出现两次几乎一模一样的日食！6585 天这个周期由于这一特点而变得很奇妙，它有一个专门的名称，叫

做沙罗周期，这个名称来自古巴比伦，它的希腊文含义是“重复”。古巴比伦人早在两千五百多年前就知道了这一周期。由于日食的确切日期取决于新月，而新月之间的间隔是朔望月，因此沙罗周期的确切长度由 223 个朔望月所确定，比较精确的数值是 6585.32 天，或 18 年零 11 天又 8 小时。

作为应用沙罗周期的例子，我们可以看一看 2009 年 7 月 22 日经过中国长江流域的，被称为“最壮观日食”的日全食，那次日食的全食时间长达 6 分 39 秒，属于超长日全食。与它以沙罗周期相间隔的前三次日食分别发生在 1955 年 6 月 20 日，1973 年 6 月 30 日和 1991 年 7 月 11 日，也都是日全食，全食时间分别为 7 分 8 秒，7 分 4 秒和 6 分 53 秒，与当前天文条件下日全食持续时间的理论上限 7 分 31 秒相差不多，也都是超长日全食，彼此间非常相似。不仅如此，我们还可以很放心地预言，与那次日食往未来方向间隔一个沙罗周期的 2027 年 8 月 2 日，也一定会发生一次持续时间很长的日全食（瞧瞧，现在咱们也能预言日食了）。

利用沙罗周期的特点，人们对日食进行了归类，将被沙罗周期所分隔的各次两两相似的日食归为同一序列，称为沙罗序列。每个沙罗序列有一个序列号，比如 2009 年 7 月 22 日那次日食所属的序列号是 136，即沙罗序列 136。那是一个著名的沙罗序列，它之所以著名，除了当前的全食时间特别长以外，还有一个更重要的原因，我们将在本节的末尾予以揭晓。

有关沙罗序列，还有几个重要特点值得一提。细心的读者也许注意到了，在沙罗周期中，除了 18 年零 11 天这个大头外，还有一个 8 小时的零头。这个零头虽然不大，却不容忽视。由于地球每 24 小时自转一周，因此这 8 小时的零头意味着同一个沙罗序列中，相邻的两次日食在经度上大致相差 $1/3$ 个地球，即 120° ，比如前面提到的经过中国长江流域的沙罗序列 136 日食，它的上上次日食发生在中美洲和太平洋上，下一次则将移师非洲北部。同一地点的观察者是无法观察到沙罗序列中的相邻日食的（从这点上讲，古巴比伦人能够发现沙罗周期实在是一件很奇怪的事情，感兴趣的读者可以查查资料，探究一下他们是如何发现沙罗周期的）。有关沙罗周期的另一个重要特点是它具有一定的寿命，而不能千秋万载。这是因为虽然 19 个食年的长度非常接近 223 个朔望月，但毕竟不是完全相等。仔细的计算

表明，前者比后者长了 0.46 天。由此导致的后果，是经过一个沙罗周期后，月球相对于升交点或降交点的位置将会偏离 0.48° 。我们在前面说过，日食食季的角度范围约为 37° ，因此经过不到 80 个沙罗周期，月球位置的总偏移就会超过食季的角度范围，这意味着沙罗序列的终结，这个过程的时间约为 1300 多年。因此沙罗周期是不能千秋万载的——确切地说是只能千秋，不能万载。

日食的发生还有其他一些规律，限于篇幅，我们就不介绍了。对日食规律的研究不仅能让天文学家们预言未来日食出现的时间、地点及持续时间，而且还能帮助历史学家们确定某些曾经提及过日食的历史事件的准确时间（比如希罗多德所记载的那次因日食而终止的战争就被历史学家们确定为最有可能发生在公元前 585 年），并且校正古代的历法。对日食规律的推算——如我们在上面所做的——从原理上讲虽然是直接了当的，但要想做得精确却很不容易，需要考虑各种细微引力摄动的影响。以对日食带的推算为例，由于月球阴影在地球表面大部分区域的运动速度高达每秒几百米，几分钟的时间误差就足以造成上百千米的空间误差。依据这样的预言去追逐日食，就会像革命大片中那些智力低下的敌军一样，完全扑错地方。

在接下来的篇幅中，我们简单介绍一下日食的种类（图 3）。在日食中，如果月球的本影扫过地球，相应的日食就称为日全食，被本影扫过的区域称为全食带；如果本影无法触及地球，但其延长区——即所谓的束后本影——扫过地球，相应的日食就称为日环食，被束后本影扫过的区域称为环食带；如果本影和束后本影都无法触及地球，而只有半影扫过地球，相应的日食就称为日偏食，被半影扫过的区域称为偏食带。显然，在日全食发生时，月球的角直径必须大于太阳，而在日环食发生时，月球的角直径必须小于太阳。这两种情形都能发生，是因为我们在“太阳的故事——重返古希腊”中提到过的一个事实：即“在太阳和月球之间存在一个美妙的巧合，那就是它们看起来几乎是一样大的”。这一巧合，加上月球和地球的公转轨道都是椭圆，从而月地和日地距离都会随时间改变这一特点，使得月球的角直径有时候比太阳大，有时候比太阳小。这是我们有时候能看到日全食，有时候能看到日环食的根本原因。

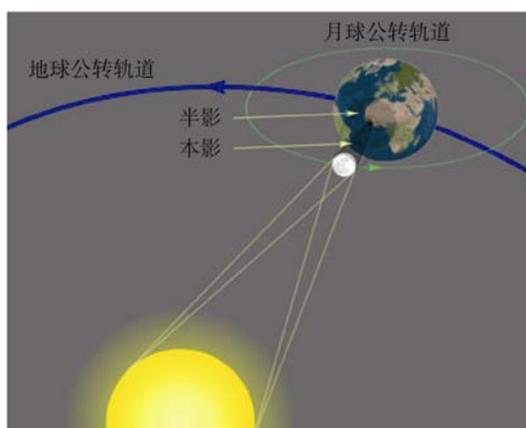


图 3 日食的图示

由于无论月球的角直径比太阳大还是小，两者终究都很接近，而地球表面又是弧形的，因此偶尔会出现一种更罕见的日食，那就是地球表面的某个区域离月球较近，使得月球看上去比太阳略大，从而形成日全食。而该区域之外的某个其他区域离月球较远，使得月球看上去比太阳略小，从而形成日环食。这种同时具有全食和环食的特殊日食被称为全环食。在本世纪的 224 次日食中，日全食、日环食、日偏食和全环食的次数将分别为 68、72、77 和 7 次。如此种类繁多的日食出现在同一颗行星上，这不仅在太阳系中是绝无仅有的，甚至在任何其他恒星的周围，其形成概率也是微乎其微的。从这个意义上讲，我们在地球上所能看到的日食是一种极为稀有的天象奇观。事实上，即便对地球来说，这种奇观也不是任何时候都存在的。日食带的狭窄（全食和环食带的最大宽度都只有两三百千米）说明月球与地球的距离只要再大一点，日全食就将不复存在，只要再小一点，日环食就会烟消云散。而天文学家们早就知道，月球与地球的距离一直都在增加（目前的增加速度为每年 38 毫米），因此早年的地球上不存在日环食，未来的地球上则不会有日全食。从地质学时标上讲，目前这么丰富多彩的日食格局即使在地球上也是我们这个时代独有的。

在结束本节前，我们还要补充一点。我们在本节中虽然只讨论了日食，但前面提到某些概念，比如食季，是同时适用于日食和月食的。食季既是日食的摇篮，也是月食的温床，在一个食季中，月球挡在太阳和地球中间就是日食，地球挡在太阳和月球中间则是月食。那么这两种情形哪一种更容易发生呢？仔细的分析表明，是日食，日食的食季长度

要明显大于月食。因此，在地球上所能看到的日食次数要明显多于月食。从这个意义上讲，日食在大范围上虽然很稀有，在如今我们这个小小星球上却很寻常，是一种既寻常又稀有的奇观。

读到这里，有些读者也许会感到困惑，因为在多数人的印象里，日食远比月食稀罕。之所以会有这种印象，是因为月食发生时，只要天气许可，半个地球上的人都可以看到，而日食发生时，即便老天开眼，也只有一个狭长日食带上的人才会有眼福，而且这日食带还常常落入海洋、沙漠、雪山、极地等人烟稀少的地区。因此虽然从总次数上讲日食比月食更多，但除非你不惜跋山涉水去追逐日食，否则你所能看到的日食会明显少于月食。尤其是，假如你特别眷恋家乡，一步都不愿离开的话，也许一辈子都未必能看到一次日食（但依然可以看到几十次月食）。以日全食为例，在地球表面随机选定的地点上，平均每隔 410 年才能看到一次。

日食——尤其是日全食——不仅是一种美丽的天象奇观，在天文学家们的眼里，更是研究太阳的绝佳机会。对于天文学上的多数研究来说，研究对象的过于暗淡是天文学家们面对的主要困难之一，但对于太阳研究来说，情况恰恰相反，过于明亮才是最大的麻烦制造者。太阳的明亮甚至使得天文学家们不敢用精密的哈勃望远镜观察离太阳最近的水



（上接 13 页）辐射不是“宏观物体的波动性”，而是宏观的黑洞热辐射光子、电子等微观粒子的量子效应。

霍金这样解释黑洞的上述量子效应：众所周知，任何时空中都存在真空涨落：真空中会不时有虚的正能粒子（如正能电子）和负能反粒子（如负能正电子）产生，产生的虚正、反粒子对又会很快湮灭。由于虚粒子对存在时间 Δt 很短，时间 - 能量测不准关系 $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ 产生的能量涨落会掩盖住虚粒子对的存在，使我们测不到它们。所以，这是一种不可测量的虚过程。但是，实验早已观测到真空涨落导致的一些间接效应，证实了真空涨落这种物理效应的存在。

霍金指出，当真空涨落发生在黑洞表面附近时，会有一种新的效应产生。黑洞内部单向膜区有一个特性：允许负能实粒子存在，我们通常的时空（包括黑洞外部附近的时空），都不允许负能实粒子存在，只准正能实粒子存在。在黑洞表面（视界）附

星。在这种情况下，日食的存在对于太阳研究有着极大的重要性。这种重要性早在两百多年前就得到了令人瞩目的确立。在 1780 年 10 月 27 日的日全食期间，美国独立战争的交战双方（英、美）为了让哈佛大学的天文学家们能在全食带上进行科学研究，破天荒地作出了停战一天的决定（可惜天文学家们不争气，竟然算错了日食带，以至于功败垂成）。

最后，我们要兑现诺言，来揭晓前面提到过的使 2009 年 7 月 22 日经过中国长江流域的日全食所属的沙罗序列 136 著名的“更重要的原因”。这个原因很简单：如果我们将 2009 年 7 月 22 日往前推 5 个沙罗周期，即 32927 天，我们将得到一个日子：1919 年 5 月 29 日。在那个日子里也发生了一次属于沙罗序列 136 的日全食，它的持续时间也很长：6 分 51 秒。熟悉物理学史的读者看到这个日期也许已经想起来了，是的，在那一天英国天文学家爱丁顿对广义相对论中光线的引力偏折效应进行了检验。那次检验也许是日全食期间所有科学研究中最著名的一次，正是它使得沙罗序列 136 更加出名。

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>

近，真空涨落产生的虚粒子对，有可能湮灭掉，也有可能都掉进黑洞，这两种情况均不导致新的物理效应。然而，还有第三种情况：负能的一个落入黑洞，正能的一个飞向远方。例如负能反粒子（如负能正电子）落入黑洞，正能粒子（如正能电子）飞向远方。落入黑洞的负能正电子在单向膜区顺时前进落向奇点，使那里减少一个正电子的质量，并增加一个正电荷。这时远方观测者看见了一个带负电的正能电子向他飞来，而黑洞减少了一个电子的质量和电荷（注意电子与正电子质量相同，电荷相反），于是他认为黑洞向他射出了一个电子。霍金指出，虚粒子对中的负能正电子落入黑洞，再顺时前进落向奇点，同时正能电子飞向远方；这一过程可以等效地看作一个正能电子逆时前进从奇点跑到黑洞表面，在那里被散射，再顺时前进飞向远方。

感兴趣的读者可参看本刊（现代物理知识）2008 年第 1 期 54 页的文章《黑洞与它的研究者》。