

光子大逃亡

卢昌海

在前面几期中，我们介绍了发生在太阳核心区里的太阳能量产生机制。这一机制不仅在理论上可行，而且经过对太阳中微子的细心探测，以及对太阳中微子问题的艰辛求解，在观测上也得到了很漂亮的确立。从某种意义上讲，隐藏在太阳最深处的那个最远离经验的“恐怖核心”，反而可以说是成为了整个太阳结构中被我们了解得最可靠的部分。

如果说迄今为止我们的太阳故事所展现的大都是太阳研究中的坚实大地——那些被观测或实验牢牢确立了的事实或理论——的话，那么从本节开始，我们将会更多地去欣赏太阳研究中的绚烂天空——那些尚在云端里的谜团。我们将会看到，那样的谜团简直是层出不穷，而且在绝大多数谜团面前，我们再也没有像解决太阳能量产生机制或太阳中微子问题那样的好运气了，因为那些谜团中的绝大多数直到今天依然是未解之谜。当然，这本身未尝就不是一种好运气，尤其是对于正在从事或有志于从事太阳研究的人来说更是如此，因为生在一个有许多未解之谜可以探索的时代里，要远比生活在一个只能在“小数点后第六位数字”上做文章的时代幸运得多。

好了，现在继续我们的太阳故事。

读者们想必还记得，在我们的注意力被喧宾夺主的中微子吸引走之前，我们是在谈论与阳光有关的话题，比如太阳的光谱、太阳的光度、太阳为什么会发光等。现在我们要把注意力转回到阳光上来——毕竟，那是太阳之所以成为太阳的最重要特征，也是它对我们最至关重要的东西。我们已经知道，阳光的巨大能量来源于发生在太阳核心区的核聚变反应。那个核心区有多大呢？细致的研究表明，它从中心算起，向外延伸到大约 $1/4$ 个太阳半径，即 17 万千米处。从体积上讲，这一区域在整个太阳中所占比例不到 2%，但由于密度超高，占太阳质量的比例却达到一半左右。在这一区域的边缘，太阳物质的密度从最中心的 160 克/厘米^3 左右降到了约 20 克/厘米^3 （略高于黄金的密度），温度则降到了 $800 \text{ 万}^\circ\text{C}$ 左右。那样的环境虽然仍很恐怖，对于氢核聚

变成氦核的核聚变反应来说却已低得有些勉强了，在那以外，核聚变反应就基本绝迹了。

但这个边缘对于太阳能量的主要载体——诞生于恐怖核心的无数光子来说，却是一段新的征程——一条逃亡之路——的开始，它们将用十几万年的漫长时间，穿越厚达几十万千米的太阳物质，把巨大的能量带出去，让“红星”照耀四方。

与中微子的“挥一挥衣袖，不带走一片云彩”相比，光子的逃亡之路可就艰辛多了。原因很简单，因为光子会参与电磁相互作用——即与带电粒子发生相互作用。而更糟糕的是，在太阳的恶劣环境下，物质粒子间存在着极为猛烈的相互碰撞，其结果是“鸡飞蛋打”——几乎每个原子都会被碰掉一些电子。那些被碰掉的电子当然全都是带电粒子，而那些丢了电子的原子——其中大多数已经变成了一丝不挂的原子核——也都是带电粒子。因此太阳物质几乎是清一色由带电粒子组成的，是所谓的等离子体。光子穿越这种到处都是带电粒子的物质时，就像女人穿越到处都是化妆品专柜的购物城，将会无可避免地受到巨大干扰。

但不管怎么干扰，光子终究是要逃出去的，否则我们就看不到太阳了。我们首先要问的是：在带电粒子的重重包围之下，那些光子究竟是以何种方式完成胜利大逃亡的庄严任务的？

解决这个问题的思路并不深奥，甚至在中学物理中就已经有了，因为所谓的光子大逃亡，归根到底是一个能量传输问题，即把太阳核心所产生的能量传输出去。而能量的传输有三种众所周知的方式：传导、对流和辐射。从微观上讲，这三种传输方式的差别在于：传导主要是通过物质粒子间的相互碰撞来传输能量，但那些物质粒子本身却并不参与大范围的运动，我们做饭时热量通过锅底传到锅内所用的就是这种传输方式；对流主要是通过物质粒子本身的大范围运动来传输能量；我们做饭时，沸腾的水就是用这种方式在传输能量；而辐射则主要是通过光子本身来传输

能量，我们围坐在一个火炉旁所感受到的“温暖”就是用这种方式传输过来的能量。

在这三种能量传输方式中，传导在气态物质中通常起不到主要作用（请读者想一想这是为什么？），像太阳那样的巨型“气球”也不例外，因此这一选项可以被排除掉。这样一来，我们就只剩下了两个选项：对流和辐射。一道选择题只有两个选项，这运气看来很不错，因为就算瞎蒙也该有一半的可能性答对。

但有关太阳的这道选择题却是一个例外。

对于这道选择题，早年的天文学家们曾经作出过自己的选择，那就是对流，理由是我们所熟悉的唯一一种大范围气态物质——地球大气——就是用这种方式来传输能量的。

可惜那是一个错误选择。

这一选择在1906年遭到了德国物理学家史瓦西的反对。史瓦西认为对于像太阳内部那样与地球大气截然不同的物理环境，很可能存在一种具有太阳特色的能量传输方式，而不能简单地套用地球大气的经验。作为对这一观点的论述，他提出了一种判断太阳内部是否会出现对流的巧妙方法，那就是从理论上分析一小团太阳物质的运动，看它能否演变成对流。

具体地说，史瓦西从理论上考察了一小团由于偶然原因而变得比周围环境稍热的太阳物质。由于热胀冷缩的缘故，那一小团物质的体积会稍稍膨胀，密度则会稍稍降低，由此产生的后果是在周围物质的浮力作用下上升。但在上升的过程中，由于周围太阳物质的压强在变小（因为太阳物质的压强是越往上就越小——请读者想一想这是为什么？），它会发生进一步的膨胀，这种膨胀会使它的温度降低。另一方面，随着这一小团物质的上升，它周围环境的温度也在降低，因为太阳内部物质的平均温度也是越往上（即越远离核心区）就越低。既然那一小团物质与它周围环境的温度都在降低，显然就出现了哪个温度降低得更快的问题。如果是周围环境的温度降低得更快，那么该小团物质将会在上升过程中维持比周围环境更热的特点，从而持续上升，那样就会产生对流。反之则它的上升势头会因温度降低得比周围环境更快而终止，并在重力的作用下转为下降，那样就不会产生对流。

这样，史瓦西就提出了一个分析太阳内部能否产生对流的判据，即通过比较太阳内部物质的平均

温度变化与一小团特定物质在上升过程中的温度变化，来判断能否产生对流。这一判据被称为史瓦西判据。利用这一判据，史瓦西推翻了前人的选择，代之以自己的选择，那就是辐射。

可惜那也是一个错误选择。

读者可能会纳闷：一道只有两个选项的选择题，怎么会两个选项都错误呢？原因很简单：因为两个选项都不完全，都只在一定区域内才适用，把无论哪个选项当作完整答案都是错误的。那么，怎样才能得到完整答案呢？只有一个办法，那就是计算。既然史瓦西给出了分析太阳内部能否产生对流的判据，那我们就可以——而且必须——通过计算来作出判断。这种计算所依据的就是我们在前几节中已经多次提到过的标准太阳模型。那个模型是建立在一系列很基本的物理原理——比如能量的守恒、压强的平衡等——的基础之上的，虽然算不上精细，但以粗线条而论却有很大的可靠性。史瓦西本人虽然由于他那个时代的知识所限而没能得到正确结论，但我们这些“站在巨人肩上”的幸运儿却毫无疑问可以做得比他更好一些。

那么利用标准太阳模型所做的计算给出了怎样的答案呢？那答案就是：太阳内部的能量传输方式既不是单纯的对流也不是单纯的辐射，而是在不同区域内有不同的主导方式。具体地说，在从太阳核心区的边缘（即太阳半径的四分之一处）到太阳半径的70%处（即距离太阳中心约49万千米处）的厚度约32万千米的物质层内，史瓦西判据得不到满足，能量的传输以辐射为主。这一层因此被称为辐射区（图1），它占太阳总体积和总质量的比例分

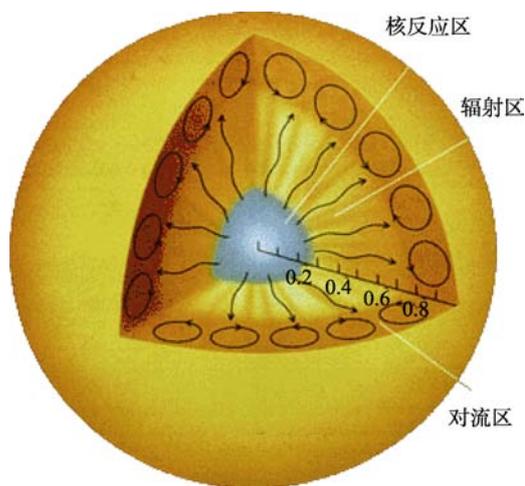


图1 太阳的内部结构

别约为 32%和 48%。在辐射区的外部边缘，太阳物质的温度降到了“只有”200 万℃，密度则降到了 0.2 克/厘米³（相当于水的密度的五分之一）。在那以外直到太阳表面的厚度约 20 万千米的物质层内，史瓦西判据得到满足，能量的传输方式转为以对流为主，这一层因此而被称为对流区，它约占太阳总体积的 66%，但由于物质密度很低，在太阳总质量中却只占了 2%左右（仍相当于 6600 个地球的质量）。

有了这样的大致图像，现在我们可以来谈谈光子大逃亡的具体过程了。由太阳核心核聚变反应所产生的光子大都“膘肥体壮”（满载着能量），比如第一类质子-质子链所产生的光子的能量在百万电子伏特（MeV）量级上，属于γ射线的范围。如果它们在逃亡时有像中微子那样的能耐，接下来的故事将只需两秒钟就能完成，不过那样的话，我们就不可能在这里读这篇文章了，因为那样的话，地球将会沐浴在致命的γ射线之中，生命的产生几乎是不可能的。幸运的是，如前所述，光子由于会参与电磁相互作用，从而在本质上是等离子体的太阳物质中无可避免地会受到巨大阻挠。计算表明，在太阳辐射区中，可怜的光子平均飞行不到一毫米就会遭遇“灭顶之灾”——被带电粒子所吸收。不过带电粒子的胃口也很有限，并无能力把一个高能光子单独“消化”掉。事实上，它们“吞下”光子后一方面会通过碰撞把一部分能量分给其他带电粒子，另一方面会几乎立刻就重新吐出一个或多个光子。那些浴火重生的新光子在能量和运动方向上都有很大的随机性，有些甚至“天堂有路它不走，地狱无门自来投”——重新向着“地狱”（核反应区）的方向飞去。如果我们追踪一个高能光子和它那些被吸收后重新发射出来的“子孙后代”的去向，我们将会发现，它们就像一群醉汉一样随处游荡。

不过，如果我们更仔细地观察这群“醉汉”，我们又会发现一些微妙的特点。比如当它们往太阳表面方向运动时，平均来说会比往相反方向运动时多走一小段距离，那是因为太阳物质的分布是越往表面方向密度越低，因此往表面方向运动的光子在被带电粒子吸收之前就有可能运动较长的距离。由于这个微妙的差别，那些“醉汉”虽然混混噩噩，总体上却是在缓慢地向着太阳表面方向运动着。另一个微妙的特点是，被带电粒子发射出来的新光子的“诞生地”越靠近太阳表面，其平均能量就越低。

这是太阳物质的温度越靠近表面就越低这一特点所产生的平均意义上的影响。因为这两个微妙特点的共同存在，光子在辐射区中的逃亡路线虽然极度曲折，但最终的效果却是慢慢地向外逃逸，而且在逃逸过程中逐渐“减肥”（能量逐渐降低）。那么，这种逃亡生涯啥时候才是个尽头呢？计算表明，一个高能光子穿越太阳辐射区平均需要 17 万年的时间，这并不是因为光子的运动速度变慢了，而纯粹是因为运动路线过于曲折。

在辐射区中，由于史瓦西判据得不到满足，太阳物质不会发生显著的对流，因此这个区域内的太阳物质相对来说是比较宁静的。如果我们能乘坐一艘假想的飞船缓缓穿越这一区域的话，相对来说将不会太颠簸。不过这种宁静在我们抵达辐射区的顶部时就开始消失了。在那里，由于史瓦西判据开始得到满足，太阳物质无法继续维持大体上静态的平衡，无时不在的温度涨落，将会使得热气团上升、“冷”气团下降，从而形成对流。如果我们继续乘坐飞船的话，滋味可就不太好受了。

细心的读者在这里可能会提出一个问题：那就是史瓦西判据得到满足只是说明在太阳物质中会产生对流，却并不表明对流一定会成为能量传输的主导方式，那么在对流区里究竟是以哪一种能量传输方式为主导呢？答案是对流（否则就不叫对流区了），因为在对流区里，太阳物质由于温度降低而变得不那么透明了，从而对辐射产生了抑制作用。在对流区里，光子携带的能量变成了热气团的内能，随着它们的对流运动而传向太阳表面。要说团体的力量还就是大，气团的运动速度虽然远不能与光子相比，但它们却不会像光子那样处处受到阻挠，其结果是，光子要用 17 万年的时间才能走完厚度为 32 万千米的辐射区，对流却只需十来天的时间就能走完厚度为 20 万千米的对流区。

那么，对流区中对流的具体形式，即那些气团的具体运动又是怎样的呢？这却是一个极难回答的问题，因为用流体力学理论所做的简单评估表明，太阳对流区中的对流是所谓的湍流型对流，它作为能量传输方式是非常有效的，但从机理上讲却复杂得令人望而生畏，因为它涉及一种迄今仍未被完全理解的现象——湍流。科学家们研究湍流已有上百年的历史，却始终未能参透它的奥秘。美国物理学家费曼曾把湍流称为是“尚未解决的经典物理学问题中最重要的一

个”。而据说著名物理学家海森伯在去世前不久也曾表示，当他见到上帝时将会问上帝两个问题：一个是为什么会有相对论，另一个是为什么会有湍流。他认为上帝有可能可以回答第一个问题。

但研究太阳结构的科学家们却想要回答第二个问题。

这个愿望迄今仍未实现。不过在长期的研究中，科学家们发展出了一些近似理论，其中很重要的一个近似理论是德国空气动力学家普朗特在 20 世纪 20 年代提出的，它把湍流中的流体元与分子运动论中的分子相类比，尤其是将湍流运动中一个流体元在与其他流体元相混合之前所走过的平均距离与分子运动论中的分子平均自由程（即分子在两次相邻碰撞之间所运动的平均距离）相类比。这种近似理论被称为混合程理论。自 20 世纪 30 年代开始，德国天体物理学家比尔曼等人将这一理论运用到了研究太阳对流区的能量传输上。20 世纪 50 年代，人们又进一步将这一理论与恒星结构模型结合起来，使之变得更为系统。再往后，随着计算机技术的飞速发展，人们开始对太阳对流区中的运动进行计算机模拟，混合程理论在那里也得到了重要应用。这类理论虽然明显只具有近似意义，但迄今为止的模拟计算显示，它可以给出定性上还算不错的结果。这种类型的结果是目前人们对太阳对流区研究的最佳成果之一。

与深藏在太阳内部的核反应区及辐射区不同，对流区由于一直延伸到太阳表面，因此对这一区域的研究结果是可以与直接观测相对比的。这就好比当我们研究一锅沸水的时候，哪怕这水是不透明的，我们也可以通过观察因水流翻腾而形成的表面波纹来推断水的沸腾程度及其他一些相关特征。太阳的表面也是如此。早在 1801 年，英国天文学家赫歇耳就在太阳表面——确切地说是在太阳大气层底部的光球层中——发现了无数形如米粒的斑点，这种斑点被称为了米粒——科学家们在取名字方面的想象力看来是很贫乏的。

这些“米粒”当然只是远远看起来才像是米粒，如果跑近了看的话，每个的线度都有 1500 千米左右，是面积比新疆还大的巨型结构，只不过是放在太阳的庞大表面上，才显得微乎其微而已。简单的估算表明，太阳表面足可容纳几百万个“米粒”。图 2 是一幅典型的“米粒”图片，细致的观测表明，在那些“米粒”中，炽热的气体以每秒几百米的速度

从明亮处升起，并向外迸射出大量光子——它们此刻的能量已降到了可见光区附近。由于那儿已是太阳的表面，再没有什么东西可以有效地阻碍重获自由的光子，它们随即以天下第一的逃命速度飞离太阳，为历时十几万年的长征划上句号。由于光子的逃离带走了能量，“米粒”中的气体温度迅速下降，并在颜色较暗的边缘部位收缩下沉。一个“米粒”的典型寿命只有几分钟。

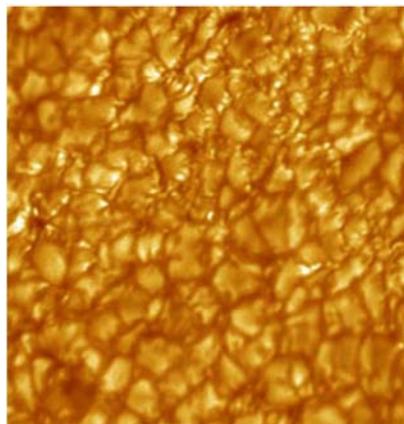


图 2 太阳表面的“米粒”

太阳表面的“米粒”是发生在对流区中的对流运动的体现，这一点是毫无疑问的。但与这种对流有关的一个插曲值得在这里介绍一下。曾经有一段时间，天体物理学家们普遍认为“米粒”以及太阳表层的对流运动是人们在流体力学中所发现的一种称为贝纳胞的结构在太阳上的翻版。贝纳胞是 1900 年法国物理学家贝纳在自下而上加热一个液体薄层时所发现的对流形式（图 3），它与太阳表面的“米粒”不仅具有外观上的相似性，而且在生成条件上也一度被认为是相同的，因为两者都被认为是在重力和浮力的共同作用下由对流运动产生的。



图 3 普通流体中贝纳胞

粗看起来，这是一个展示不同尺度物理现象之间相似性的漂亮结果。但这种相似性却在 1958 年遭到了严重质疑，因为人们发现在贝纳胞的形成过程中，一个曾经被忽略的因素——液体的表面张力——起了不可忽视的作用。为了证实这一点，科学家们甚至在“阿波罗 14 号”登月飞船的无重力环境下进行了贝纳胞实验，结果发现在重力和浮力都不存在的环境下依然可以出现贝纳胞，它的幕后推手是表面张力。这一结果不仅打破了对贝纳胞的传统理解，而且直接削弱了它与太阳“米粒”之间的可比性，因为在太阳表面极端稀薄的气体环境里并不存在表面张力，因此“米粒”的形成机制与贝纳胞起码是不可能完全相同的。这段插曲是一个很好的例子，说明在太阳物理学的研究中存在很多微妙的地方，只有很仔细地考虑到太阳环境的特殊性，才能避免似是而非的理解。

太阳表面的“米粒”除了那无数个线度约为 1500 千米的“小”米粒外，20 世纪 50 年代，人们在观测太阳表面物质的速度分布时，还发现了一种线度为 2~3 万千米的大尺度结构，它的面积比整个地球的表面积还大，它名字则跟“米粒”一样贫乏，叫做超米粒。这种“超米粒”的寿命比普通“米粒”长得多，可以有 1~2 天。在太阳圆面上，几乎每一时刻都分布着两三千个“超米粒”。与“米粒”不同的是，“超米粒”的速度分布基本上是水平的，无法找到像热气团上升、“冷”气团下沉那样简单的物理结构，从而无法把它们与对流运动简单地联系起来。“超米粒”的结构和成因也因此而成为了太阳物理中的一个不解之谜。

更热闹的是，除了“米粒”和“超米粒”外，1981 年，人们还发现了一种线度约几千千米，介于“米粒”和“超米粒”之间的新型“米粒”，它的名字读者们一定猜到了，就叫中米粒。“中米粒”的发现受到了一部分天体物理学家的欢迎，因为早在 1961 年就有人提出过，太阳对流区中的对流有可能具有不同的层次，“米粒”和“超米粒”分别对应于其中较小和较大的层次，但介于两者之间的层次却一直未能得到观测上的支持。“中米粒”的发现可以说是填补了这一空白。但不幸的是，这一观测与理论之间看上去很美的契合后来也遭到了质疑。有些科学家在仔细研究了观测数据后，认为“中米粒”有可能只是对太阳表面物质的速度分布进行分析

时采用了不恰当的统计方法所导致的“幽灵结构”，它其实根本就不存在。这方面的争议迄今仍未得到解决。

因此，不仅“超米粒”是一个谜，“中米粒”也是一个谜，只不过前者之谜在于结构和成因，而后者则干脆连存在性本身都是一个谜。那么普通“米粒”又如何呢？它是唯一一种与对流运动存在明显对应的“米粒”，从这个意义上讲，它是三种“米粒”当中被理解得最充分的一种。但即便对于它，也仍有很多微妙的地方有待理解，否则人们也就不会轻易犯下将它视为贝纳胞那样的错误了。事实上，如果把太阳上各种主要的复杂因素——比如太阳的自转或磁场等——的影响全都考虑在内的话，即便对于普通“米粒”的结构和成因，也还有很多需要探索的地方。

现在让我们把迄今介绍过的太阳内部结构列成一个简单的表格：

区域名称	范围（万千米）	主要现象	检验方法
核心区	0~17	核聚变反应	探测各个能区的太阳中微子
辐射区	17~49	以辐射为主的能量传输	?
对流区	49~69.5	以对流为主的能量传输	观测太阳表面的各种“米粒”

这个表格最引人注目的地方想必读者们都看出来，那就是在辐射区的检验方法一栏中有一个问号。其实不仅在辐射区的检验方法一栏中有一个问号，在对流区的检验方法一栏中也起码有半个问号，因为观测太阳表面的各种“米粒”虽然能告诉我们一些有关对流区的信息，但那些信息大都局限在最靠近太阳表面的那部分对流区里，相对于厚度达 20 万千米的整个对流区来说充其量只能算是“皮毛”。

那么，有没有什么手段，能像太阳中微子带给我们核心区的信息那样，带给我们有关对流区深处及辐射区的信息呢？

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>