太阳的能量

作者：**让·李兰斯坦**（LILENSTEN Jean），法国国家科研中心、格勒诺布尔行星和天体物理学研究所主任级研究员。

人们习惯地认为太阳能就是指可见光的太阳辐射。然而，太阳给我们提供能量的方式却是多种多样的：各种波长的辐射、以离子和电子组成的“太阳风”。那么，地球上这些不同形式的太阳能来源是什么？它们的起源又是什么呢？

当我们提到“太阳能”时，通常都会联想到与光相关的概念，比如光子——一种与全波长范围的电磁辐射（根据电磁辐射的波长可将其从伽马射线到可见光进行划分）（见“黑体的辐射”以及“天空的颜色”）相关的光子。当存在相对高度激发的物质时，原子和离子的能量水平会发生变化，此时就会释放出光子，并在星际空间中循环往复，这种现象尤见于在恒星中。对其通量的度量往往被限制在其可见光组分，也就是波长在 0.4（紫色）和 0.7（红色）微米（μm）之间的这部分。但这样的视角太过于局限了，相比之下，下面这样谈论太阳能会更合适些……

1. 光子沸腾源

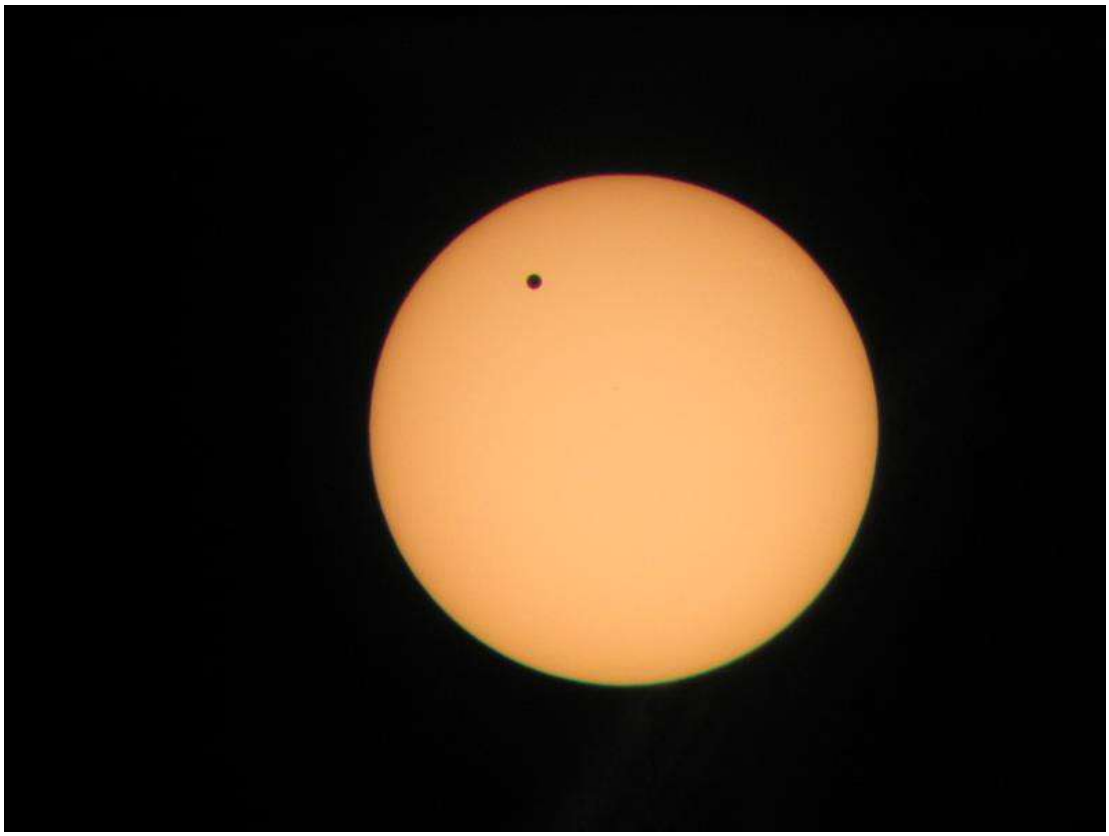

图 1. 2004 年 6 月 8 日金星经过太阳时的照片。图中黄色的盘状物为太阳的光球层。[来源：© Alandji Bourakissima]

太阳表面光子逸出的圈层被称为**光球层**，字面意思是“光子球层”，这在地球上就能被看到（见图 1）。它是一个动态的表层，在这里会以不同的周期生成一些由热物质组成的大气泡，这些气泡被称为**颗粒**或**超级颗粒**。这些气泡上下翻滚地运动着。它们有着不同的生命周期——平均来讲，颗粒的生命周期为 18 分钟，而超级颗粒的生命周期能达到 20 小时，上下翻滚的全运动周期为 5 分钟：在一个周期内，气泡生成的数量和消失的数量相等。

这个测量成果是天体物理学的一个分支——**日震学**的最早期成果之一，日震学作为近年来最富成果的学科之一，它专注于解释太阳所有的“**本征模式**”或“固有模式”（这 5 分钟的周期就构成了太阳的一个“本征模式”）。

2. 各种各样的辐射

辐射是如何从光球层逃逸出来的呢？它要经过数百万年才能从恒星中被释放出来，期间存在被无数次吸收又重新释放的过程，其**光谱**也由于碰撞被显著地

拓宽（见“天空的颜色”）。辐射能够用其波长或能量加以区分。能量与波长成反比。波长越长，辐射能量则越低。在太空气象及其对地球的影响一文中，我们给出了能量和波长之间的对应关系。

大部分太阳辐射都处于可见光的波长范围内。其中以蓝-绿光为最，它对应的可见光的波段中心的波长接近 0.5 微米（μm）。但由于所有可见光的颜色同时存在，它们的混合产生了我们常见的非常明亮的黄色，光谱中这一可见光部分所包含的能量在十年的时间尺度范围内变化量只有大约不到 0.1%，几乎不随时间改变。

不过这种变化并非微不足道：它可能是地球上区域性气候现象的起因。1550 年到 1750 年小冰期的冬季极其酷寒，法国的主要河流都结冰了，变成了可以用做马拉车车队组成的运输线。巴黎十三区有以冰川街命名的街道，就是为了纪念这一事件[1]（见“几个世纪以来太阳活动的变化和气候影响”）。

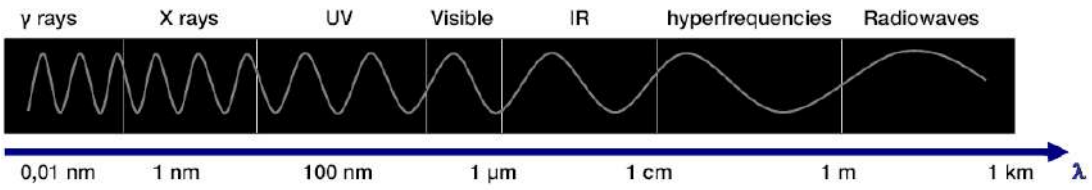

图 2. 图示为根据波长（λ）划分的不同的辐射波段。
（见“天空的颜色”）。请注意波长越长，能量越低。因此，伽马射线的能量比 x 射线的能量要高，而 x 射线的能量又比紫外线的能量要高，依此类推……

太阳也会发出可见光光谱范围以外波长的辐射。例如微波频率上的波（长波无线电波），它也是我们收音机和电视使用的波段。由于种波的能量很低，因此它们对人体皮肤的影响和电灯辐射的差不多，不会干扰到人类的日常生活。另一个例子是人类需要防晒，否则我们会被太阳晒黑或灼伤，这就是由于紫外线的作用（见“太阳光中的紫外线对细胞的影响”）。这些波的波长很短，因此，每个光子的能量都很高。而太阳大部分辐射是来自于光球层之外的层，我们称之为**日冕层**。

紫外线也只是能量辐射的一部分。太阳能够放射出能量更强的波：极远紫外线、x 射线、伽马射线。不论是在无线电还是紫外线波段，辐射的光子释放量与可见光波段相比都很小，而这部分的能量累加起来仅占太阳辐射总能量的千万分之一（0.0000001%）多一点。图 2 示出的是根据波长分布反映的太阳辐射能。

可见光谱范围之外的辐射的主要特征在于，其强度有显著的时间周期性变化。变化之初，太阳辐射能很小，在之后大约 5 年半的时间里，辐射强度能够增加了 10 倍，然后再减弱，直至回到原来的状态。该过程定义了一个“太阳周期”，也称施瓦布周期。除此之外还存在着其他的太阳周期，时间跨度从几个小时到几百年不等。

综合所有波段的能量，太阳辐射的总功率约为 4×10^{26} 瓦（约 2.6 亿瓦每太阳表面平方米（W/ m^2）；1W = 1J/s = 1N • m/s）。在云层之上，地球只接收到其中的很小的一部分——1.743×10^{17} 瓦（或 1361W/ m^2）（见“地球的大气层和气体层”）。最后一个数字在过去也被称为**太阳常数**，尽管事实上它并不像以前人们认为的那样是恒定不变的。今天，我们称其为**太阳总辐照度**。

3. 太阳风之源

我们肉眼可见的来自于光球层辐射只是太阳辐射的一部分。而且，更为重要的是：**光球层是太阳物质释放之所在**，造成这种现象的是一种被形象地称为“**太阳风**”的持续性蒸发物，。那么什么是“太阳风”呢？

太阳内部的最外层，即“对流区”，处于不断地沸腾之中。这个位置由于距离太阳中心太远，受到的引力无法将自身压实，其密度也不足以引发核反应，因此太阳的这个部分十分不稳定。然而，组成它的物质却是电离的，也就是说，它不是由原子组成的，而是由离子（带电粒子）和电子组成的，离子间是协同运动的，带电而质量轻电子能够到达各处以确保整体的电中性。这样的物质状态被称为“**等离子体**”，它是自然界中继气态、液态和固态的第四种状态。等离子体与普通物质的区别在于前者对电磁场极为敏感，而且它本身的运动也会产生电磁场（通过**发电机效应（dynamo effect）**）。对流区的基层被称为**差旋层**。差旋层是一个边界层，在这个边界层上，对流区的等离子运动与更内部的区域相摩擦，等离子体分布更为集中紧凑，不受太阳内部辐射区的运动的影响。差旋层是太阳磁场的起源。

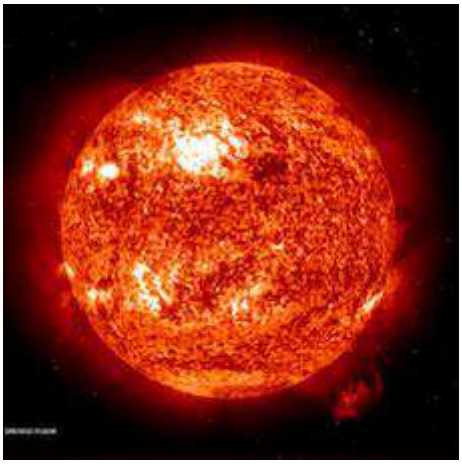

图 3. 在波长 304 nm 处拍摄的太阳耀斑的照片。在这个波长下，太阳表面动态变化比在可见光范围内更易观察到，经平滑处理后可以得到图 1 的太阳外观图；图中的明暗代表着温度的高低。[来源：SOHO / EIT，ESA-NASA]

大家都知道在沸腾的水面上会喷溅出小水滴来，太阳表面也是如此。但是由于太阳本身的自然属性，太阳喷溅的原因与沸水喷溅的又有些不同，最显著的区别是它能激发出磁场来。此外，被喷射的物质本身呈电离状态，能够非常稳定有效地承载这种磁场，以致于我们常称之为“冻结在粒子中”的磁场。根据研究方向的不同，称之为“**太阳风**”或“**星际磁场**”。

不过上述描述的观测者是站在与太阳同步运动角度的。对于处在恒星外不与太阳同步运动的观察者来说，上述粒子的运动与太阳自身的自转（平均为 27 个地球日）相辅相成。它的旋转效果类似于花园灌溉在旋转中喷出的水流：在喷壶上的蚂蚁看来，水是呈直线喷出（放射状的），而园丁看到的喷出的水流则是呈螺旋状的。从地球角度上来看，星际磁场看上去并不是直接来自于太阳内部，而是来自于其边缘，在太空环境中形成成优雅的曲线。从地球上测得太阳风的平均速度为 370 千米/秒，而浓度上为每立方米中有 500 万个这样的粒子，显得极为空旷！

卫星围绕太阳的一极运转到另一极。通过它在略大于日地距离的位置进行观测，发现了两种太阳风状态。在**日球纬度**南北纬 20° 之间，太阳风的平均速度较慢，为 370 千米每秒（km/s），而且变化很大；在不到 10° 的纬度跨度里速度增加很快，达到了 750 km/s，但同时变得不那么混乱了，再往高纬度去，速度增加减缓，于 80° 左右的纬度处速度可以达到 800 km/s 左右。五年半的时间之后，我们又观察到了太阳周围的太阳风“慢”、“快”两种状态紧密交织在一起的周期性变化了。一般称第一种情况的太阳状态为“平静期”。第二种情况则为“活跃期”。经过 10 到 13 年又恢复到最初的状态了。这一周期被称为“太阳周期”，或前面提

到的“施瓦布周期”。

正如我们所看到的，**太阳活动的表现形式各异**，其中一些在本文中没有提及到（如太阳耀斑、日冕物质抛射、日冕洞、太阳黑子……），但这些现象都展示了太阳向地球传递能量的过程。而直到 21 世纪初人们对太阳活动才有了更深入的了解，它们都与太阳的磁场变化有关。

平均而言，太阳风使太阳每天损失 10^{14} 千克的重量，仅比核心核反应辐射损失质量的四分之一略少。太阳总质量为 2×10^{30} 千克，也就是说仅通过太阳风使太阳完全消耗殆尽需要超过 5000 亿个世纪，这个数字远远超过了太阳的预期寿命 50 亿年。因此，通过太阳风损失的质量对太阳而言是完全可以忽略不计的。

参考资料及说明

[1] J. Lilensten,T. Dudok de Wit, K. Matthes, Earth's climate response to a changing Sun, ISBN 978-2-7598-1849-5,DOI:10.1051/978-2-7598-1733-7,EDPS Ed.2015

译者：郎立晨　　审校：　王晓东教授　　责任编辑：胡玉娇