

## 太阳的脉搏

卢昌海

为了回答上一篇末尾的问题，即“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？”让我们把时钟拨到1960年。那一年，在意大利科摩湖畔的一座美丽小镇召开了一次天文学会议。在会上，来自美国威尔逊山天文台的天文学家莱顿作了一个学术报告。

这位莱顿，学物理的读者可能有点印象，他曾与同事一起，用两年时间，将著名美国物理学家费曼的讲课录音整理成风行全球的《费曼物理学讲义》。在1960年的那次报告中，他介绍了自己对太阳大气层中气流运动的观测研究。

这不是一项轻而易举的研究。我们知道，在地球大气层中如果要观测气流运动，最简单的办法就是放置风速风向仪，但这招显然无法用于太阳。那么，太阳大气层中的气流运动该如何观测呢？科学家们想到了一种物理效应：多普勒效应。该效应的一个让人耳朵听出老茧来的例子，是火车交汇时对方火车的汽笛声由迎面而来时的尖锐，变成交错而过后的低缓。用物理学家们的术语来说，多普勒效应显示的是波源与观测者的相对运动对波长和频率的影响，它既适用于声波，也适用于光波，只不过后者的波速实在太快，使我们无法用感官直接体验。但科学家们可以用仪器来延伸自己的感官，从而可以观测光波的多普勒效应，并以此推算出光源相对于我们的运动速度。

观测光波多普勒效应的最典型做法，是对光波的光谱进行精密观测。我们以前介绍过，每种元素都有自己独特的光谱，就像每个人都有独特的指纹一样。而所谓独特的光谱，说白了就是独特的谱线波长和频率。因为有这种独特性，当谱线的波长和频率因多普勒效应而发生偏移时，我们就能明确无误地察觉出偏移，并依据偏移大小推算出光源的运动速度，这正是莱顿所用的基本方法。

通过这种方法，莱顿发现了什么呢？他发现太阳这个庞然大物在颤抖，而且是有规律地颤抖！确

切地说，他发现太阳大气层中的气流运动不是完全无序的，而是存在一种周期约为五分钟的振荡，这种振荡被称为“五分钟振荡”。

这一发现在太阳研究中具有里程碑式的意义，虽然其真正价值直到十几年后才被发掘出来，但它当场就给与会者中的一位带来了巨大震动。此人名叫埃文斯，是萨克拉门托峰天文台的台长。莱顿的报告之所以给他带来巨大震动，是因为他研究的恰好也是太阳大气层中的气流运动。为什么莱顿发现了新东西而他却没有呢？因为他的研究重点是气流运动的空间分布，而非时间变化。平心而论，他对研究重点的这一选择并非毫无道理，因为如我们在上一篇中所说，太阳上的气流运动是所谓的湍流型对流，这种运动的时间变化被认为是无序的，空间分布则因为有“米粒”之类的结构，以及物质密度的逐层递变，而不无探索余地。因此，埃文斯的研究重点可以说是很自然的选择。遗憾的是，科学发现有时偏偏是出人意料的，“五分钟振荡”对埃文斯来说就是如此。他对研究重点的自然选择恰恰使他与该领域最重大的发现失之交臂。

但遗憾归遗憾，成熟的研究者是不会因遗憾而消沉的。“五分钟振荡”虽已被发现，进一步的观测仍是必不可少的。更重要的是，这一现象的产生机制还是一个空白，而且在这点上，莱顿本人表示了一定程度的悲观，他认为对“五分钟振荡”作出精确计算似乎是毫无希望的。这一切对于其他研究者来说无疑都是机会。

回到萨克拉门托峰天文台后，埃文斯立刻对“五分钟振荡”展开了研究。第二年，莱顿与埃文斯又在学术会议中相遇了。这一回，埃文斯也作了有关“五分钟振荡”的报告。在报告中，他不仅证实了莱顿的观测，还利用自己在以前那些与“五分钟振荡”失之交臂的研究中发展起来的“独门绝活”，对莱顿的观测作出了重要补充。他的“独门绝活”是什么呢？是同时研究几条不同谱线的多普勒效应。这种“独门绝活”有什么用呢？用处就在于能

研究太阳大气层中不同高度处的气流运动。这是因为不同高度处的元素分布存在一定差异，而谱线是由元素产生的，因此不同谱线所对应的是不同高度处的气流运动。通过对这种不同高度处的气流运动的观测，埃文斯对“五分钟振荡”在太阳大气层中的空间传播进行了粗略研究，并提出了一种“五分钟振荡”的产生机制。

埃文斯认为，“五分钟振荡”是一种由太阳表面的“米粒”所激发的大气层现象。具体地说，他认为“米粒”的上升犹如推动气体的巨型活塞，而“五分钟振荡”则是“活塞”运动在太阳大气层中激发出的声波。这一机制听起来不无道理。因为“五分钟振荡”是在观测太阳大气层中的气流运动时发现的，而“米粒”，如我们在上一篇中所说，则是在太阳大气层底部的光球层中被发现的，而且是光球层中分布最广的结构。这两者同属太阳大气层，将它们联系起来，并在太阳大气层的范围之内解决问题无疑是很自然的思路。这种很自然的思路在将近十年的时间里吸引了多数研究者的目光。

不过，埃文斯的机制要想行得通，还必须解决一个关键性的问题，那就是被“活塞”激发出的声波为什么偏偏要青睐“五分钟”这一振荡周期呢？这个问题成为了很多研究者的努力方向。

在介绍那些努力之前，我们要先对太阳大气层的结构作一个简单介绍。如上所述，太阳大气层的最底部，是“米粒”们赖以存身的光球层。我们肉眼所见的阳光大都来自该层，以前介绍过的太阳表面温度（约 5800K）也是指该层的有效温度。该层的厚度在几十到几百千米左右，物质密度约为海平面附近地球大气密度的万分之一。在光球层之上，是所谓的温度最低层，该层的有效温度约为 4100K，厚度约为 500 千米。再往上，则是厚度约 2000 千米的色球层。该层自内向外密度递减几百万倍，温度却不降反增，上层温度可达 20000K 左右。色球层再往上，还有所谓的过渡区和日冕等。

现在回到埃文斯机制所面临的那个关键问题上来。很明显，太阳表面环境的恶劣性，使得无论什么机制产生的声波都必然是紊乱的，而不可能只有一个固定周期。那么，究竟是什么原因使得“五分钟”这一周期脱颖而出呢？科学家们想到了乐器中的谐振腔。在乐器中，谐振腔的作用是使特定周期的声波得到加强，其余则被抑制。科学家们想到，如果

太阳大气层也有类似功能，岂不就有可能解释“五分钟振荡”了吗？

这是一个很漂亮的想法。不过科学离不开细节，光有想法是不够的，还必须有计算。为了进行计算，我们必须知道太阳大气层是如何构成谐振腔的？我们知道，谐振腔之所以能加强特定周期的声波，抑制其余，是因为声波经腔壁反射后与腔内声波发生干涉之故。因此，要想知道太阳大气层如何构成谐振腔，关键在于找到腔壁。对此，科学家们提出了各种假设。

比如有一种假设认为，腔壁位于温度最低层的上下两侧。为什么呢？因为气体中的声波波速会随温度升高而增大，这意味着在温度最低层的上下两侧，声波波速都会增大（因为温度升高）。另一方面，当声波从波速小的区域进入波速大的区域时，会因折射而往水平方向偏折。将这两点联系起来，就有可能出现这样一种情形，即在温度最低层附近的区域里，声波无论向上还是向下传播，都会往水平方向偏折，直至被反射回来为止。这种情形一旦成真，那两个使声波反射回来的界面无疑就构成了谐振腔的腔壁。

类似的假设还有若干种，我们就不一一列举了。可以告诉大家的是，所有这些在太阳大气层里做文章的假设在经过具体计算后，全都遭遇了滑铁卢。埃文斯是一位努力的研究者，但看来不是一员福将，他对研究重点的“自然选择”使他与“五分钟振荡”的发现失之交臂，他对产生机制的“自然选择”则将一系列努力引向了困难。这其中有一个典型的困难是因为太阳大气层内的谐振腔全都是薄层，声波要想被那样的薄层所禁锢，其传播方向必须很接近水平（否则的话，虽然能被偏折，却无法偏折到被反射的程度）。而观测却发现，“五分钟振荡”的传播方向有很大的垂直分量。另一方面，即便声波的传播方向真的很接近水平，那些假设也还是玩不转，因为计算出的周期不对头，无法集中在五分钟附近。此外，有些假设给出的“五分钟振荡”的寿命也不对，只有几分钟，而实际观测到的“五分钟振荡”往往可以持续数小时、数天、乃至数月。至于埃文斯把“米粒”视为“五分钟振荡”的起因，其正确与否倒显得不那么重要，因为在太阳那样的恶劣环境下，有许多因素可以产生声波，起因不是关键。

所有假设都碰了壁，莫非应了莱顿的“乌鸦嘴”，

对“五分钟振荡”作出精确计算是毫无希望的？

没有人知道答案。但任何谜团对科学家来说都是召唤，是不断攀登的动力。山峰越高，顶上的风景或许就越别致。1970年，一位新的攀登者——加州大学洛杉矶分校的一位助理教授——提出了一种“五分钟振荡”的新机制。这位助理教授名叫乌尔里克，本科学的是化学，后来转向天文，两年前（1968年）才刚刚获得博士学位。这位“新科博士”的过人之处是一举摆脱了在太阳大气层中做文章的“陋习”。对乌尔里克来说，“五分钟振荡”在太阳大气层中被发现，并不意味着它一定就是单纯的大气层现象。理由很简单，太阳物质在大气层以下是不透明的，因此普通光学手段注定只能发现大气层中的运动，这只是观测手段的局限性，并不说明现象本身的范围。这就好比用肉眼只能看到水面以上的冰山，并不说明冰山只存在于水面以上。

事实上，在乌尔里克之前，美国基特峰国家天文台的天文学家弗雷泽就已经发现了“五分钟振荡”存在于太阳深处的迹象。因为他发现太阳的亮度会因“五分钟振荡”而发生细微变化。由于太阳的亮度取决于能量，而后者来自太阳内部，单纯的大气层振荡是无法对其产生可观影响的，因此亮度变化说明“五分钟振荡”与太阳内部物质的运动也有关系。弗雷泽的这一观测发现给了乌尔里克很大的启示，使他将注意力投向了太阳内部。

乌尔里克将注意力投向太阳内部，除受弗雷泽的影响外，与他自己的学术背景也不无关系，因为他博士论文所研究的就是太阳内部的对流层。方向有了，接下来还得看细节。乌尔里克知道，那些被观测否决掉的大气层假设并非一无是处，它们的一个关键部分必须得到保留，那就是谐振腔，因为那是在像太阳那样高度无序的世界里产生特定周期的唯一手段。既然保留了谐振腔，那么新机制的关键就依然是：腔壁在哪里？对于这个问题，乌尔里克给出了全新的答案。

在乌尔里克的答案中，上方腔壁位于对流层顶部很接近光球层的区域。该区域之所以成为腔壁，是因为声波在太阳内部的传播存在一个所谓的截止频率，只有频率高于截止频率的声波才能传播。不仅如此，这一截止频率还与温度有关，温度越低（即越接近太阳表面），截止频率就越高，能够传播的声波也就越少。计算表明，在对流层顶部接近光球

层的区域中，截止频率将会高到使几乎所有声波都无法传播的程度。自内向外的声波碰到这种区域时，将会像光线碰到镜面一样遭到反射，这毫无疑问就构成了腔壁。

那么，下方腔壁又在哪里呢？在太阳肚子里。这一腔壁的原理与上文介绍的大气层假设相同，即源于声波的折射。具体地说，越往太阳肚子里走，声波的波速就越高（因为温度升高），经折射后就越往水平方向偏折，直至被反射回来为止。与大气层假设不同的是，乌尔里克的机制将整个太阳内部都作为了声波的活动场所，有足够大的空间使声波“浪子回头”，因而不必像大气层假设那样要求其传播方向接近水平。另外，从这一机制中不难看到，下方腔壁的位置不是固定的，而与声波的传播方向有关。传播方向越接近水平（比如图1中位于对流区中的深色曲线），下方腔壁的位置就越浅，声波在上方腔壁的反射次数则越多（即水平方向的波长越短）；反之，传播方向越接近垂直（比如图1中透入辐射区的浅色虚线），下方腔壁的位置就越深，声波在上方腔壁的反射次数则越少（即水平方向的波长越长）；当传播方向垂直到一定程度时（比如图1中深入核心区的深色曲线），甚至会出现下方边界消失，完全靠上方边界反射的情形（这依然构成谐振腔）。

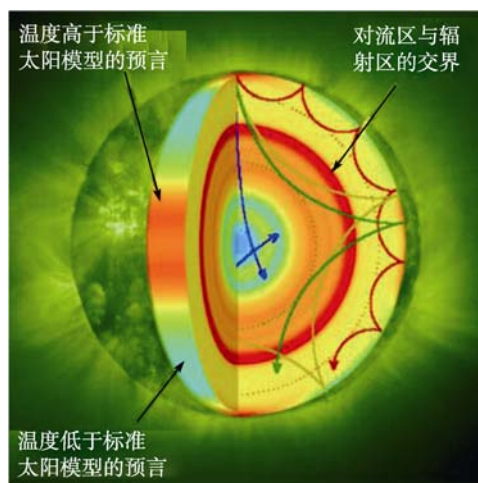


图1 太阳内部的声波模式

定量计算表明，乌尔里克的机制可以克服大气层假设所面临的各种困难。不仅如此，这一机制还预言了一些尚未被观测到的东西。其中最突出的一个，是它预言“五分钟振荡”不是单一频率的振荡，

而是由一系列彼此接近的频率共同组成的，每个频率对应于一个不同的水平波长。如果将频率与水平波长间的关系绘成图线的话，很像是一系列抛物线。这个预言对乌尔里克机制具有判决性的意义。如果它被证实，那么乌尔里克机制就会像科学史上许多其他成功理论一样，经由从观测到理论，从理论到预言，再从预言到证实那样的典型模式而被确立。反之，如果它被否决，那就没啥可说了，该机制只能乖乖入住博物馆。

那么，观测给出了怎样的判决呢？别着急，得等五年时间，因为当时人们对“五分钟振荡”的观测精度还不够高。在等待期间有必要提到的是，几乎与乌尔里克同时，两位哈佛大学的研究者也提出了类似的机制，并进行了数值计算。不过他们没有预言频率与水平波长间的关系。1972年，另一位研究者对乌尔里克的机制进行了改进，去除了一些粗糙近似。1975年，日本东京大学的两位研究者对声波在上方腔壁的反射进行了更细致的研究，给出了频率与水平波长间更精确的关系（与乌尔里克的结果相差不大）。

与这些理论进展同步，观测数据也在积累之中。乌尔里克本人无疑是最急切盼望观测结果的人，为了让观测“提速”，他将自己的研究生罗兹派往了萨克拉门托峰天文台（即埃文斯工作过的地方）。1975年，当罗兹积累了足够多的数据，准备撰写博士论文时，一个不幸的消息传了过来：他被人抢了——不是抢劫，是抢先。德国夫琅禾费研究所的天文学家德伯纳已经发表了类似的观测结果。一年后，罗兹也发表了自己的结果。那些观测结果没有让乌尔里克失望，它们的精度虽只能达到百分之几的量级，却明显地显示出了乌尔里克预言的抛物线（参阅图2）。

这样，乌尔里克的机制就得到了初步证实。这不仅对乌尔里克是一个喜讯，对于太阳研究更是具有划时代的重要性，因为它开启了一个全新的研究领域：日震学。这是一个通过观测太阳上的各种振荡现象来研究太阳内部结构的新领域。在那些振荡现象中，以类型而论，最重要的是上面所介绍的声波，这是一种压强波，也称为p模；以周期而论，最重要的是上面所介绍的“五分钟振荡”。但除此之外，也还有其他一些类型和其他的周期，不过因为观测比较困难，重要性相对较低，就不在这里讨

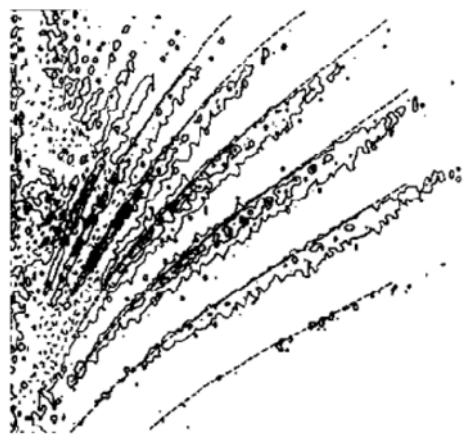


图2 “五分钟振荡”的早期观测结果  
(频率与水平波长之间的关系)

论了。日震学之所以重要，是因为乌尔里克机制告诉我们太阳上的振荡可以深入太阳内部的各个区域，因此日震学可以带给我们有关太阳内部各个区域的重要信息。像温度、密度、元素丰度、自转速度等与振荡传播有关的性质都可以通过日震学手段来加以研究。打个比方来说，太阳上的振荡仿佛是太阳的脉搏，而日震学手段则相当于是给太阳把脉问诊。乌尔里克攀到了山顶，那里的风景果然很别致，可以一直看到太阳的肚子里。不过要指出的是，日震学这个与地震学相类似的名称其实并不贴切，太阳上虽然有日震，但日震只是产生振荡的诸多原因之一，而且日震本身并非日震学的研究对象。

日震学这一研究领域虽然诞生了，但为了让它真正发挥作用，除不断改进理论计算外，还必须在观测上精益求精，其中最重要的一条是得把振荡周期尽可能测准了。在大学甚至中学物理实验课上做过周期测量的读者想必都知道，要想把一个周期运动的周期尽可能测准，要诀是观测尽可能多的周期数目。周期数目越多，所测周期的相对误差就越小。那么，为了让日震学真正发挥作用，需要观测多少个周期呢？答案是一万个以上。对于“五分钟振荡”来说，一万个周期约为35天，因此需要连续观测35天以上。

粗看起来，这似乎不是什么大不了的要求。科学研究花费几个月、几年甚至更长时间都是家常便饭，我们以前介绍过的探测太阳中微子的实验就动辄持续几年以上。但对“五分钟振荡”的观测却有一个问题，那就是太阳只有在晴朗的白天才能被观

测到，一到晚上就没有了，而光子又不像中微子那样能够穿透整个地球。因此连续 35 天以上的观测绝不是轻而易举的事情，非但不轻而易举，经这么一说，简直要变成“不可能任务”了。幸运的是，情况也没那么糟，因为地球上有些地方的太阳是可以连续半年悬挂在天上的，那就是两极附近的地区，那里有所谓的极昼。

看来，要想对“五分钟振荡”进行精密观测，必须到极地去。极地的环境那是出了名的恶劣，温度低就不用说了，最麻烦的是，到了极地也不一定就能进行连续观测，因为极昼不等于晴天，冰雾、风暴、卷云等都会造成观测的中断。而且极地的生活条件那是相当的艰苦，通信联络那是相当的不便。到那里去做研究，套用一句网络流行语来说，叫做“哥做的不是研究，而是寂寞”。即便如此，依然有一些天文学家心甘情愿地去过寂寞日子。1980 年 1 月，两位法国天文学家格雷克和福塞特赴南极进行了观测，可惜运气一般，只获得了 5 天的连续观测时间。不久之后，美国基特峰国家天文台的天文学家哈维和杜瓦尔也去了南极，在一个小得像清洁间的房间里一住就是两个月。不仅如此，他们两人后来还多次重返南极，其中有一次获得了长达 65 天的连续观测时间。这些研究为日震学的崛起立下了汗马功劳，也再次并且非常漂亮地证实了乌尔里克的那些抛物线（图 3）。

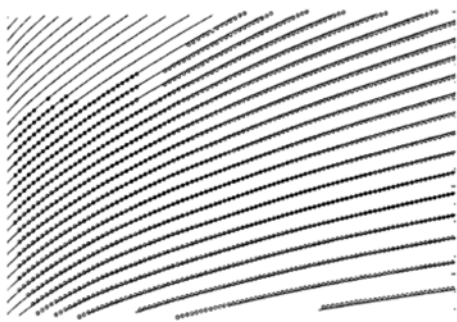


图 3 “五分钟振荡”的南极观测结果  
(频率与水平波长之间的关系)

利用极昼并不是获得长时间连续观测的唯一手段。熟悉历史的读者想必知道，当年英国殖民地遍布全球时曾号称“日不落帝国”，因为太阳在任何时候总能够照到它的某一块殖民地上。与这种帝国的原理相类似，我们也可以利用分布于世界各地的若干观测站来构筑一个“日不落”观测系统。1979 年，

英国伯明翰大学的科学家率先通过两个观测站实践了这种方法。自 20 世纪 90 年代中期开始，美国牵头组建了一个更大的“日不落”观测系统，由位于加那利群岛、西澳大利亚、美国加州、美国夏威夷州、印度及智利的六个观测站组成，称为太阳全球振荡监测网。

与太阳全球振荡监测网的建设几乎同时，一种更优越的观测手段也开始付诸实施，那就是人造卫星。这种手段的优势是不言而喻的，建在地面上的观测站，无论是两极附近的观测点，还是“日不落”的观测网，都免不了要“看天吃饭”。只有翱翔于九天之上的卫星，才能真正自由自在地对太阳进行连续观测。1995 年，美国国家航空航天局发射了一颗“太阳和日球层探测器”。该探测器定位在太阳与地球之间的所谓第一拉格朗日点上，与地球公转同步地绕着太阳运转，可以常年不断地观测太阳。利用这样的现代手段，对“五分钟振荡”的观测精度已经达到了百万分之一以上的量级。

那么，日震学研究取得了什么成果呢？最重要的成果就是对标准太阳模型进行修正及检验。我们在前文中提到过，太阳模型看似粗糙，实际上却相当精密。之所以如此，除了它对物理原理的运用相当缜密外，另一个很重要的原因，就是标准太阳模型中的参数大都经过了日震学手段的检验及修正。

日震学研究所取得的另一项重要成果，是对太阳内部自转速度的分布作出了精密推断。与像地球这样的固态星球不同，太阳内部不同深度、不同纬度处的自转是不同步的。日震学研究不仅发现并测定了这种不同步性，而且还发现这种不同步性在对流层底部以下的一个被称为差旋层的薄层中，非常突然地转变成了刚性自转。这一点是由前面提到的罗兹和德伯纳共同发现的，这两人因验证乌尔里克的预言而“撞车”后，很快化“敌”为友成为了合作者，联手展开新的研究。他们所发现的这个差旋层虽然很薄，而且埋藏得很深，却很可能有着极大的重要性。一般认为，发生在差旋层中的这种自转突变现象与太阳磁场的产生有可能存在密切关联，但很多细节仍有待进一步研究。有读者可能会问：太阳的自转方式为什么会在差旋层那样一个薄层内发生突变呢？很遗憾，这是有关太阳的诸多谜团中的一个，迄今尚无答案。

除上述成果外，日震学研究还有一个引人注目

的方面，那就是能够预报一部分所谓的太阳活动——即诸如黑子和耀斑那样的现象。那些现象有时会对地球造成影响，比如耀斑有时会干扰无线电通信。日震学为何能预报太阳活动呢？因为它可以探测到太阳背面的活动。它为何能探测到太阳背面的活动呢？因为那些活动大都跟太阳磁场有关，而太阳磁场会使太阳物质产生压缩、沉降等作用，那些作用又进而会影响到声波的传播，使得从太阳正面传往背面，并经背面反射回正面(整个过程约需6~7小时)的声波比正常情况提前十来秒钟。通过对这一点的观测，天文学家们能相当准确地描绘出太阳背面的活动。由于太阳自转一圈需要二十几天，因此描绘出太阳背面的活动，意味着天文学家们可以提前若干天预报那些转到正面后会对地球产生影响的太阳活动。这或许是日震学研究中最具实用意义的一面。

最后，让我们将上一篇末尾的表格补全，作为

对当时所留问题的回答：

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及利用日震学手段
辐射区	17~49	以辐射为主的能量传输	利用日震学手段
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”及利用日震学手段

### 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>



## 科苑快讯

### 科学家们在星系团的尺度上证实了红移效应

检验引力现象很简单：通过二楼的窗子走出去（禁止付诸实践），看看会发生什么！但是要想检验爱因斯坦的引力理论——广义相对论，难度就要大得多。该理论的内容是：一个物体的引力会使其周围的空间和时间扭曲。尽管研究人员在太阳系的尺度上证明了广义相对论，但是在整个宇宙的尺度上验证该理论是更具挑战性的。

哥本哈根大学尼尔斯·玻尔研究所的拉德克·沃杰塔克（Radek Wojtak）带领一组研究人员着手检验广义相对论的一个经典预测：光在逃离引力场的时候会损失能量，引力场越强，光损失的能量就越多。结果，从一个星系团中心散发出来的光子应该比星系团边缘的光子损失的能量更多，因为星系团中心区的引力最强。星系团是包含了成千上万个星系的大型天体系统。因此在波长上，来自星系团中心的光比来自边缘的光更长，移向光谱的红端。这个效应被称为引力红移现象。

沃杰塔克及同事知道，测量单个星系内的引力红移会很困难，因为星系内引力红移效应非常小，而且需要将这种红移效应跟个体星系的轨道速度以

及宇宙膨胀造成的红移效应分离开来。研究人员从斯隆数字巡天计划中搜集了8000个星系团的数据，他们通过平均这些数据处理了这个问题。“这样做是希望通过研究星系团中星系之间的红移分布特点来发现引力红移效应，而不是分别查看各个星系的红移效应，”沃杰塔克解释说。

果然，研究人员发现正像广义相对论预测的那样，星系团中的光发生了红移，而且与到星系团中心的距离成比例。“我们可以测量出星系之间红移效应的微小差别，可以看得出来来自星系团中心区星系的光不得不爬出那里的引力场，而来自边缘星系中的光可以较为轻松地散发出来，”沃杰塔克说。2011年9月28日，这些发现发表在《自然》（*Nature*）杂志在线版上。

除了证实广义相对论之外，这些研究结果也有有力地说明了拉姆达冷暗物质宇宙模型。这个已经流行于世的宇宙学模型表明宇宙的大部分是由不可见物质构成的，这种物质与构成恒星和行星的普通物质不发生相互作用。这项检验结果也支持暗能量的存在，暗能量是似乎正在使宇宙膨胀的一种神秘力量。

胡德良译自：美国《科学》杂志网站科学此时频道 2011年9月28日