

最美丽的行星——土星

卢昌海



一、能“浮”在水上的行星

美国天文学家泰森写过一本自传，叫做《天空不是极限》。在其中，泰森提到他 14 岁那年有幸与很多科学家同船前往非洲西北海岸观看日全食。在船上举办的趣味竞答中，泰森因答出一道关键的题目而大大露了脸。那道题目是：除美丽的光环外，土星还有什么特征与其他行星截然不同？答案是：土星是太阳系里唯一可以浮在水上的行星——因为它的平均密度不到 0.7 克/厘米^3 ，比水还小。

我读到泰森的这段回忆时不禁有些扼腕，因为我在他那个年龄时也是知道这一点的，可惜却不曾有那样的机会来“显摆”。不过，咱们这篇土星故事倒是可以从土星的这一特点开始谈起。

关于这一特点，其实应该指出的是：所谓土星“可以浮在水上”只是形象描述，便于让人对土星的平均密度比水还小这一特点有一个深刻印象，事实上

却是不成立的。读者也许会说，那是当然啦，因为根本就没有那么大的“海”，能容得下土星嘛。这当然也没说错。不过，土星之所以不能浮在水上并非只是因为没有那么大的“海”，而是原则上就不可能。为什么呢？因为当普通物质，比如水的数量积累到能与巨大的土星相提并论时，甚至远远不到这一数量时，引力就将成为主宰一切的力量。那些本质上是由原子或分子之间的其他相互作用产生的，在日常尺度上相当“顽固”的宏观物性在引力面前将会“一败涂地”，遭到彻底改变。

引力的这种主宰作用我们其实早就见识过了，比如在上一篇介绍木星时我们就已提到过，像氢那样的所谓气体在木星引力产生的巨大压强作用下可以变为液体，乃至成为“液态金属”。而所有大型天体共有的接近球形的形状则从另一个侧面告诉我们，在巨大的引力面前，组成大型天体的任何物质本质上都是“软”的，只能任由引力将之“揉捏”成天然的形状——球形。知道了这一点，就可以很清楚地推断出，倘有一个以体积而论容得下土星的“海”，那么不仅其深处的物态将显著不同于普通的液态水，而且土星也决不可能浮在“海”上，而是会“融化”到“海”里，两者共同组成一个接近球形的新天体。这是引力所能允许的唯一结果。

谈完了这段插曲，我们正式介绍一下土星。

跟木星一样，土星也是一个气态巨行星，它的质量约为木星质量的 30%（或相当于地球质量的 95 倍左右），体积约为木星体积的 68%（或相当于地球体积的 764 倍左右），两个数据都在太阳系已知行星中位居第二。土星的这两个数据给我们提出了一个问题，那就是：土星和木星在块头上的差别为什么远不像质量上的差别那么悬殊？这个问题的答案某些读者或许猜到了，那就是我们在介绍类地行星时曾经提到过的，

行星的质量越大，引力就越强，自重造成的压缩作用也就越显著。由于气体的压缩性远大于固体，因此虽然气态巨行星并非整体气态，自重造成的压缩作用仍比类地行星的显著得多。事实上，某些模型计算显示，气态巨行星存在一个与元素组成有关，但与总质量几乎无关的特征半径。对于元素组成像土星和木星那样的气态巨行星来说，这个特征半径约为 70000 千米，很接近木星的平均半径，这是土星和木星在块头上的差别远不像质量上的差别那么悬殊的主要原因。

同样跟木星一样，土星虽是气态巨行星，其实也只有外层物质才是真正气态的，无论以相对质量还是相对体积而论，气态部分实际上都并不大。气态巨行星跟类地行星的最大不同之一，与其说是气态与固态之别，不如说是前者不像后者那样存在一个可以明确指认的固态“表面”，因为气态巨行星的物质状态是自外而内渐变的。

具体地说，土星物质自外而内的渐变是这样的（当然也主要是基于模型分析）：表面以下约 1000 千米处，土星物质将由气态转变为以液态氢为主的液态。这个深度与木星物质由气态转为液态的深度几乎一样，这一点可能会让细心的读者感到奇怪，因为土星的质量远小于木星，引力产生的压强也小于木星，为何物质状态会在几乎同样的深度上由气态转为液态呢？这是因为物质的状态跟温度也有密切关系，土星由于离太阳更远（平均距离约为 9.5 天文单位，比木星离太阳的 5.2 天文单位远了近一倍），相应地，同等深度的壳层内的土星物质的平均温度要比木星物质的平均温度更低，从而更容易变成液态，这一因素恰巧抵消了压强的不足。再往下，在深度约 15000 千米处，液态氢进一步变成了液态金属氢。而最终，在一个半径约 25000 千米的核心区域里，聚集了土星物质里的重元素，数量与木星的相比可能略小，但仍比整个地球的质量还大一个数量级左右。

由于离太阳更远，土星云层的平均温度也比相应的木星云层的平均温度更低，这种温度差别产生了一个很显著的观测效应，那就是形成了一个几乎覆盖整个土星的氨冰构成的高空云层。这个云层不仅给了土星一个貌似“文静”的模样，而且也是土星那淡黄色

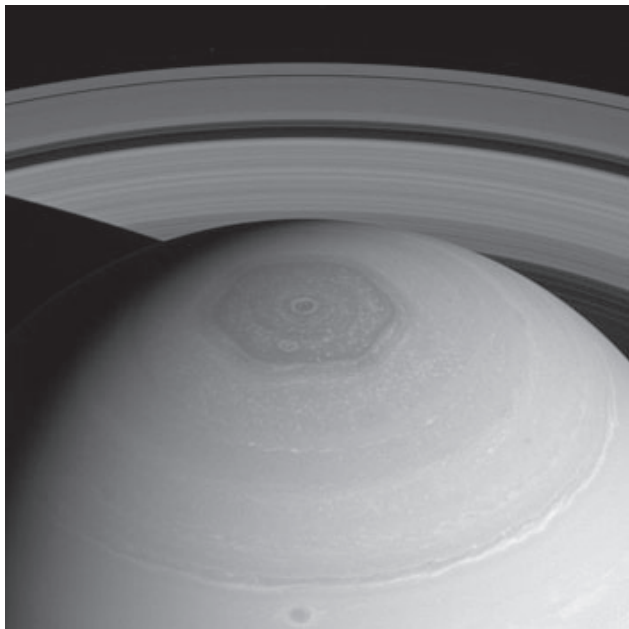
基本色调的主要来源。不过，这个貌似“文静”的模样纯属表面现象，在它下面的真正的土星大气运动，是狂暴程度与木星大气运动相比有过之而无不及的，有时甚至会撕裂氨冰云层而露出峥嵘。在对土星有些基本了解之后，这一点其实是顺理成章的，因为造成木星大气运动狂暴的主要原因——星体深处的热量造成的对流以及星体的快速自转——对土星来说也是一个都不缺的。

与木星高度相似，土星向外辐射的能量也比它从太阳吸收的能量更多，且多出的部分也相当显著（比来自太阳的总能量更多）。跟木星不同的是，土星由于引力较弱，不太可能像木星那样以自身的缓慢收缩作为额外能量的全部来源（虽然那本身也只是假设）。那么，土星的额外能量从何而来呢？这个问题在很长一段时间里难倒了科学家们。假如这个问题得不到正面解决，留给我们的将是一个很糟糕的假设，那就是假设土星远比太阳系的其他行星更年轻。这个假设之所以会被提出，是因为所有行星在形成之初都处于高温状态——因为都是无数次大碰撞的产物，然后慢慢冷却。土星不够“冷”的一种显而易见的可能性就是它形成于不那么遥远的过去，从而残留了更多的大碰撞余温。但估算表明，要想用这个假设解释土星的额外辐射，土星的年龄将只有 25 亿岁——比太阳系其他行星年轻了整整 20 亿年！从目前公认的太阳系演化理论的角度讲，这个假设是相当荒谬的。但如果不接受这个荒谬假设，就必须为土星的额外能量找到一种新来源。

到底什么机制可以为土星的额外能量找到新来源呢？最近科学家们在这方面有可能取得了一些进展，他们提出了一种被称为“氨雨”的机制。按照这种机制，土星内部的液氨会像下雨一样落向土星的中心，在下落过程中将引力势能转变为热能。模拟计算显示，这种机制不仅具有一定的物理可行性，与观测到的土星额外辐射相比也有不错的吻合，因而是颇有希望的。有趣的是，这种机制从某种意义上讲跟木星的缓慢收缩一样，也是一种早年曾被用来解释太阳的能量来源，却不幸遭到淘汰的机制，当然细节上是完全不同的，因为在后者中落向太阳中心的不是“氨雨”而是陨星。

这些在解释太阳的能量来源时遭到淘汰的机制在行星世界里浴火重生不是偶然的，宇宙的浩瀚提供了很大的机会，使得很多不违背物理定律的机制都有可能在这个角落里找到让自己亮相的舞台。

同样与木星高度相似，土星也是一个自转很快的行星。这个太阳系行星里的“千年老二”不仅质量和体积排行“老二”，自转周期之短也同样是“老二”——略多于 10 小时，与木星相近而远比其他行星的短。由于自转之快接近木星，密度和引力却远低于木星，土星因自转造成的形变比木星的更为显著：赤道直径比两极直径长了近 12000 千米（相应的扁率约为 9.8%），几乎相当于地球的直径。除自转很快外，土星跟木星一样，也存在“较差自转”的现象，而且比木星的更显著，赤道附近区域和两极附近区域的自转周期约为 10 小时 14 分钟，与其余部分相比短了约 25 分钟，远比木星“较差自转”所涉及的 5 分钟来得大，这是土星大气运动甚至比木星大气运动更为狂暴的重要原因。



“卡西尼”号拍摄的土星“六边形”

从细节上讲，土星大气中虽没有像木星大红斑那样引人注目的结构，却也有自己的“独门”奇观：一个位于北极区域的“六边形”。这个“六边形”是土星云层里的一个巨型图案，边长将近 13800 千米，以面积而论足可放下地球而绰绰有余。由于所处位置等

因素的影响，这个“六边形”巨型图案从地球上直接观测是比较困难的——虽然在知道其存在之后也并非不能，因此直到 20 世纪 80 年代才在对“旅行者”系列飞船所拍摄的相片作技术分析时被发现，此后则分别得到了地球上的直接观测，以及“卡西尼号”土星探测器所拍摄的相片的证实。

土星上的“六边形”巨型图案是如何形成的呢？科学家们也作了探讨。在旋转流体中出现多边形——尤其是六边形——图案的本身是算不上神秘的，因为那是实验室里就能再现的东西（比如桶中的旋转流体就能产生出那样的图案）。但实验室里的那些多边形图案能否用来说明土星上的“六边形”则是尚无定论的，因为土星云层的环境跟实验室里产生多边形图案的环境有着不小的差别——比如土星云层里并不存在“桶”。不过经过很多科学家多年的研究，有些模拟土星云层环境的计算已经可以得出与土星上的“六边形”相近的结果，虽不能算一锤定音，却给了人们很大的希望。

二、土星的光环和卫星

关于土星本身，我们就介绍到这里。照说这个系列既然名为“经典行星的故事”，重点就该只是行星本身，在以往各篇中，我们也确实是这么做的，甚至连我们头上的那轮明月——地球的卫星——也没占到什么篇幅。不过到土星这里，有必要破一次例了。因为所有其他行星都可以独自出镜，唯独土星是连一张不带光环的相片都很难找到的——当然，指的是近距离“全身照”。因此，虽为“身外之物”，土星的光环却实在是这颗行星“神圣不可分割的部分”，值得破例介绍。

我们在上一篇的末尾称土星为“太阳系最美丽的行星”，这一点如今大约算得上是公认无疑的。但另一方面，我们也提到了“她不仅不像金星那样顶着‘阿佛罗狄忒’或‘维纳斯’的美名，而且还有一个特‘土’的中文名字”。出现这种“名不副实”的情形并非偶然，乃是因为土星的美丽在于其光环，而土星的光环却是肉眼无法看见的，因而在人们为经典行星命名的年代里完全不为人知。

最早发现土星光环的人是意大利科学家伽利略。

1610年，这位用望远镜观察星空的科学先驱发现土星是一个左右各长了一只“耳朵”的行星，用他比较正式的文字来说，“土星不是单个的，而是由三个彼此几乎相接的部分组成的”。由于那时伽利略已经发现了木星的四颗卫星，因此地球以外的其他行星有卫星已不再是出人意料之事，但土星那两只“耳朵”不仅形状不像卫星，块头远大于卫星，而且也不像卫星那样在相对较短的时间之内就改变位置。更奇特的是，它们的位置也并非完全不变，只是变得特别缓慢。到了1612年，又一桩奇事发生了：土星的“耳朵”不翼而飞！这一现象让伽利略发出了“对于这种如此令人惊讶，如此出人意料，如此新奇的情形，我不知道说什么才好”的感慨。感慨之余，他也许想起了土星因之而得名的那位巨神在希腊神话里叫做克洛诺斯，其最著名的“事迹”就是吞吃自己的儿子。“土星吃掉了自己的孩子吗？”伽利略如是问道。不过一年之后，土星的“耳朵”又重新长了出来，这问题也就不了了之了。

伽利略虽发现了我们如今称为土星光环的东西，但他的望远镜不够大，使他终其一生也未能窥视出土星“耳朵”的真面目。不过尽管不知道土星“耳朵”的真面目，它的存在却也印证了伽利略的一个重要观点，即行星并不如当时人们宗教式想象里的那样完美。伽利略的很多天文发现，比如月球的地貌，太阳的黑子等，都直接冲击了天体完美的观念，土星的“耳朵”乃是又一个例子。伽利略对这一发现相当重视，在正式宣布之前就先用字谜的形式确立了优先权。据说这是开了科学家用字谜宣布发现的先河。自那以后，字谜不仅在包括牛顿、胡克在内的科学家之中，而且还在当时跟科学家的区分还比较模糊的炼金术士、占星术士和巫师之中流行了起来。

那么，最早意识到土星“耳朵”是光环的人是谁呢？是荷兰科学家惠更斯，时间为1655年。那时伽利略已经去世13年了，望远镜技术也有了进一步提高。利用时间带来的“技术优势”，惠更斯发现被伽利略称为“耳朵”的东西乃是一个与土星不相接触的既薄且平的环。如果土星的“耳朵”是一个既薄且平的环，那么它的形状不像卫星以及块头远大于卫星就都不是

问题了，不像卫星那样在相对较短的时间之内就改变位置也变得显而易见了，因为环转来转去也仍然还是环，只有随着土星本身相对于地球的方位改变才会缓慢改变；甚至连它的消失和重现之谜也迎刃而解了，因为那只不过是随着土星本身绕太阳的公转，在每个公转周期中会有两个时段，环恰好以侧面对着地球，由于很薄的缘故，环的侧面哪怕用望远镜也无法看到，就自然形同消失了（感兴趣的读者可以据此推算一下，土星光环两次“消失”之间会间隔多长时间？）。

但是惠更斯虽然从大致形状上发现了土星光环，土星光环究竟是什么东西组成的，却依然是个谜。在此后很长的时间里，很多天文学家对土星光环作了细致观测，也作出了一些新发现，比如意大利科学家卡西尼在土星光环中发现了缝隙，但对于土星光环的组成，则大都认为是固体——或者更确切地说，被缝隙隔开的那些相互嵌套的环每个都被认为是固体。这一局面直到两百年后的19世纪中叶才有了实质改变。

改变的契机是土星光环的固体模型遭遇了很大的动力学上的困难。比如著名的法国科学家拉普拉斯发现，由于离土星很近，土星光环会受到来自土星引力的巨大潮汐作用。在那样的情形下，土星光环要想维持为固体，必须在密度分布和旋转速度等方面满足相当苛刻的条件。不仅如此，土星光环的固体模型还存在着不稳定性，受到很小的扰动就会坠落到土星上。这些困难虽未使人们放弃固体模型（事实上，就连拉普拉斯本人也通过某些连他自己也说不出细节的假定，顽固地相信着土星光环的固体模型），却无疑削弱了它的说服力。另一方面，在那两百多年间人们又发现了土星光环的某些新变化，比如新缝隙的出现和旧缝隙的变大。这些变化虽然缓慢而细微，对土星光环的固体模型却构成了显著挑战。有鉴于固体模型左支右绌的不良表现，1855年，剑桥大学圣约翰学院将研究土星光环的运动及稳定性作为了第四届亚当斯奖的选题。

两年后，这届亚当斯奖被年仅26岁的麦克斯韦所摘取。麦克斯韦经过缜密研究，将土星光环固体模型的成立条件压缩到了足以与观测相矛盾的狭窄范围之内，从而实际上排除了固体模型。不仅如此，他还同时排除了土星光环为液体的可能性。经过那样的排

除，最终只剩下了一种可能性，那就是土星光环是由“无数相互分离的粒子”所组成的。由于当时的观测手段尚不能对土星光环的细致结构进行判定，因此麦克斯韦的研究是一种典型的理论预言。这一预言在40年后的1895年得到了初步证实：光谱学研究显示出土星光环的转动及振动方式都与它由“无数相互分离的粒子”所组成的假设相一致。而最终，“先驱者号”、“旅行者号”、“卡西尼号”等行星际飞船的近距离观测直接证实了土星光环确实如麦克斯韦所预言的，是由“无数相互分离的粒子”所组成的。

按照我们现在的了解，土星光环的结构是非常复杂的，伽利略观察到的“耳朵”属于其中最亮的部分，卡西尼观察到的缝隙则是最亮的部分当中的缝隙。那缝隙如今被称为卡西尼缝，宽度约为4800千米，被其隔开的两部分环分别被称为A环和B环，其中B环最亮，位于内侧，从距土星中心约92000千米处延伸到117600千米左右（宽度约25600千米）；A环次之，位于外侧，从距土星中心约122200处左右延伸到136800千米左右（宽度约14600千米）。除这些最显著的环和缝之外，在B环以内和A环以外还各有其他的环，在更细致的观察下，则不仅环内有缝，缝内也还有环，复杂程度远远超乎早先的想象。

土星光环的结构虽然复杂，延展范围虽然广阔，厚度却极薄，比如最明亮的B环的平均厚度只有十来米。厚度十来米，延展范围几万乃至十几万千米，这是一种什么样的比例呢？它相当于一张面积比天安门广场还大的薄纸！土星光环如此扁平当然绝非偶然，而是引力相互作用造成的。从某种意义上讲，土星光环简直是一个天然实验室，适于探究引力相互作用下的多体问题，因为土星光环的很多特征都是引力相互作用下的多体问题所产生的相对稳定，从而也相对容易研究的形态。比如土星光环的高度扁平乃是因为相对于平均轨道平面以一定倾角运动的粒子比较容易与倾角相反的粒子相碰撞（就好比一批方向混乱的车子对撞的几率比追尾的几率大），而那樣的碰撞平均而言会减小两者垂直于平均轨道平面的速度分量，从而倾向于使两者的轨道都更接近平均轨道平面。这种过程很快就会使得组成土星光环的粒子高度集中到同一

平面上来。

当然，土星光环也绝非严格的平面，在土星卫星等天体的引力摄动之下，土星光环上会出现种种波动，幅度大的可达数千米（即相当于光环厚度的数百倍）。这种有趣的波动现象使一些天文学家觉得，研究土星光环曾经像是研究地理，如今倒像是在研究变化多端的天气。除了波动外，土星光环的宽度、环与环之间的缝隙等等也都与土星卫星的引力摄动、以及各种各样的轨道共振等因素密切相关，土星的某些小卫星甚至像牧羊犬看护羊群一样控制着土星光环的宽度，它们也被恰如其分地称为了“牧羊犬卫星”。这些都是虽有一定复杂性，在以复杂著称的引力多体相互作用之中却是相对容易的问题，从而十分有趣。

如果说对于土星光环的形态我们算是有了一定的理解，那么这种理解其实是在土星光环存在的前提下展开的。土星光环的存在本身——即它为什么会存在，以及从什么时候开始存在——却是完全不同的问题。这其中土星光环为什么会存在是相对来说容易解释的，因为早在1849年，法国科学家洛希就从理论上证明了，一个靠自身引力凝聚起来的天体离一个中心天体足够近时，会因为自身引力无法抗衡中心天体的引力潮汐作用而解体。这个解体距离被称为洛希极限，具体数值跟两个天体的物质组成等若干因素有关。具体到土星光环上，分析表明，土星光环的主体部分位于其相对于土星的洛希极限之内，因而无法像其他区域里的物质那样在自身引力作用下凝聚成卫星，从而只能以光环的形式存在。

但土星光环从什么时候开始存在则迄今尚有争议。有些天文学家认为土星光环是新近才产生的，当然，所谓“新近”是天文学意义上的，起码也有数千万年，具体的过程则是：一颗土星卫星“新近”跑到了土星的“卧榻之侧”，不幸与其他卫星碰撞解体或被土星的引力潮汐作用撕成了碎片，总之是粉身碎骨了。对于这种观点，天文学家有一个幽默的表示，那就是：假如恐龙有望眼镜或裸视力足够厉害的话，它们看到的土星也许是光秃秃不带光环的，因为在它们的时代，土星光环尚不存在。这种观点的理由之一

是土星光环非常明亮，所含多为“冰清玉洁”的水冰粒子，说明其存在时间不长，尚未被星际尘埃所污染；理由之二则是从土星光环与土星卫星等的互动中推测出土星光环不是一个长期稳定的系统，从而存在时间不可能太长。不过，这些理由都并非很“铁”，因为无论污染的快慢还是稳定时间的长短都跟很多因素有关，难以确切推算。这也就给另一种看法提供了空间，那种看法认为土星光环可能跟土星本身差不多古老。

土星不仅有美丽的光环，而且也跟木星一样有一个庞大的卫星系统。若笔者所记不差的话，那么在笔者念小学或中学那会儿，已知的土星卫星有 23 个，木星卫星却只有 18 个，土星的卫星系统以卫星个数而论比木星的还庞大。后来随着观测手段的演进，两者的卫星数目都在攀升，但土星仍保持了一段时间的领先。不过后来，“胳膊拧不过大腿”，土星的优势终于不保，在卫星数目上也不幸跟自己“千年老二”的身份相符了。截至 2013 年，土星的卫星数目以 62 比 67 落后于木星。

在土星的诸多卫星中，也不乏明星卫星。木星有四大“伽利略卫星”，土星则有一个大名鼎鼎的土卫六——也称为“泰坦”。这颗以巨神命名的卫星是 1655 年由惠更斯发现的，有时也被称为“惠更斯卫星”，它的块头在太阳系所有已知卫星中位居第二，仅比木卫三略小，却比八大行星之一的水星还大。

土卫六不仅块头巨大，而且有很多独一无二之处。比如它是已知的太阳系卫星里唯一有大气层的——而且还相当浓密。土卫六的表面平均气压甚至比地球的还高 45% 左右，大气总质量也比地球的高出近 20%。与木卫二（即“欧罗巴”）相类似，天文学家们对土卫六上存在初等生命的可能性也有一定的期待。出于对土卫六的巨大兴趣，2004 年 12 月，前面提到过的“卡西尼号”土星探测器向土卫六投放了一个名叫“惠更斯号”的登陆探测器。2005 年 1 月 14 日，“惠更斯号”在土卫六上成功登陆，成为在外太阳系天体上登陆的第一个航天器。在“惠更斯号”所取得的观测成果中，包含了对土卫六另一个独一无二之处的证实，那就是土卫六是已知太阳系卫星中唯一存在表面液体的——它有大量真正的（即并非干涸的）湖泊。这是一个非同小可的特点，别说在卫星之中，哪怕把行星

也算上，也只有地球能在这一特点上与土卫六为伍。由于既有大气又有液体，土卫六的地貌与地球的相当相似。不仅如此，“惠更斯号”还在土卫六上“听”到了风声，这恐怕是人类在地球之外首次听到天然的声音！不过，这一切的相似都只是形式上的，土卫六的大气和表面液体的成分——尤其是后者——跟地球的是很不相同的，而且用地球人的审美来看，土卫六的地貌虽与地球的相似，整体氛围却令人窒息：浓密的大气层加上离太阳的遥远使得土卫六的表面光照只有地球表面晴天光照的千分之一左右（不过仍相当于数百个满月），而且从土卫六表面看到的大气颜色是橙色的。一个昏暗的橙色世界如果还不足以使人抓狂的话，那么我们还可以再提醒一句：土卫六的表面温度也不太舒适——约为零下 180 摄氏度（-180℃）。

这样我们就结束了对土星、同时也是对太阳系六大经典行星的介绍。比六大经典行星更遥远的太阳系天体都是近代、现代乃至需要留给后代去发现的，那其中目前位居行星之列的只有天王星和海王星那两个不太巨大的气态巨行星。再往外，在若干光年之外，在其他恒星周围，目前已发现了数以千计的行星，它们共同组成了一个正在快速扩容的丰富多彩的行星世界。相对于如此庞大的行星世界来说，太阳系六大经典行星只是沧海一粟，但人类对六大经典行星的探索却并不渺小，因为它不仅是漫长征程的起点，也是未来探索的缩影。沿着这条探索的征程，无数令人兴奋的东西还有待我们去发现。



作者简介

卢昌海，本科就读于上海复旦大学物理系，毕业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。著有《那颗星星不在星图上》、《上下百亿年》、《黎曼猜想漫谈》（获第七届吴大猷科学普及著作原创类金签奖）、《从奇点到虫洞》、《小楼与大师》（入选“2014 中国好书”）、《因为星星在那里》、《霍金的派对》等，个人主页：<http://www.changhai.org/>。