

探秘气态巨行星的大气层

文 / 陈厚尊

按照传统的分类法，太阳系的行星可以划成两大类：一是岩石行星，也叫类地行星，成员有水星、金星、地球、火星和全部的矮行星；二是气态巨行星，也叫类木行星，成员有木星、土星、天王星和海王星。其中，构成类地行星的主要物质是硅酸盐，以及各种含碳化合物；而类木行星的物质组分更接近太阳，主要是一些氢、氦、氖等轻元素。顾名思义，气态巨行星表面的物质是气态不是固态，探测器无法在表面着陆。因此，从某种意义上讲，我们在望远镜中看到的木星、土星等天体，其实是它们浓密的高层大气，其下面还有深厚的平流层、对流层等结构。不过，行星学家普遍认为，在类木行星的最深处，靠近中心的位置，应该也有一个岩质的内核，大小与类地行星

相当。

由于气态巨行星的表面覆盖的是一层可自由流动、形变的气体，所以，类木行星的表面特别容易受到万有引力、自转离心力、科里奥利力的影响，产生的流体现象不胜枚举，堪称天然的“流体力学实验室”。这些有趣的现象大多是天体力学与流体力学的交叉产物。更令人惊叹的是，其中一些还能在我们的日常生活中寻到类似的现象。就好像牛顿当年领悟到苹果下落与月球绕地球运行是同一种力在起作用一样，我们也能从这些流体现象中体会到物理规律在宏观和宇观上的某种统一。我们下面试举几例做简单的介绍。

木星和土星的云带

木星表面规则的条状云

带是木星大气最显著的特征之一，在视宁度（Seeing）良好的情况下，只需通过一架7.62厘米口径的小型业余天文望远镜即可清晰地目视到它们。事实上，土星的表层大气也有一条条如丝绸般光滑的云带，只是土星云带间的对比度比木星低了不少，肉眼看起来不太显著罢了。经过灵敏的行星相机拍摄、叠加、处理后，就能清晰地分辨出土星的云带。木星和土星的云带都属于一种规模巨大的行星级天气系统。实际上，我们的地球也存在类似的天气系统，只是地球的大气层相对稀薄，且不同纬度的天气规律同时受到海洋、陆地地形等因素影响，导致地球的“云带”变得支离破碎。即便如此，这些支离破碎的“云带”还是主导了地球上绝大多数地区的四季气



哈勃空间望远镜拍摄的木星云带全图，方向上北下南。橘红色的椭圆形区域即是著名的大红斑

候，这便是中学地理课程上曾介绍过的东风带、西风带和信风带。三条风带之间是所谓的极地高压带、副极地低压带、副热带高压带和赤道低压带。

木星是太阳系八大行星的“老大哥”，个头非常庞大，直径相当于11个地球，体积相当于地球的1321倍。然而，如此巨大的气态行星，自转一周只需短短的9小时55分钟！这使得木星赤道附近的自转线速度达到了12.6千米/秒，比地球表面的逃逸速度（11.2千米/秒）还快！在巨大的离心力作用下，木星整体呈现为一颗旋转对称的椭球体，赤道地区的半径比两极地区凸出约4600千米，相当于0.7个地球。在科里奥利力的作用下，木星云带的移动速度也很快，且方向不一。如下面的木星云带图，大红斑上方两条色彩最浓重的云带就是位于木星赤道南、北两侧的赤道云带。我们在业余天文设

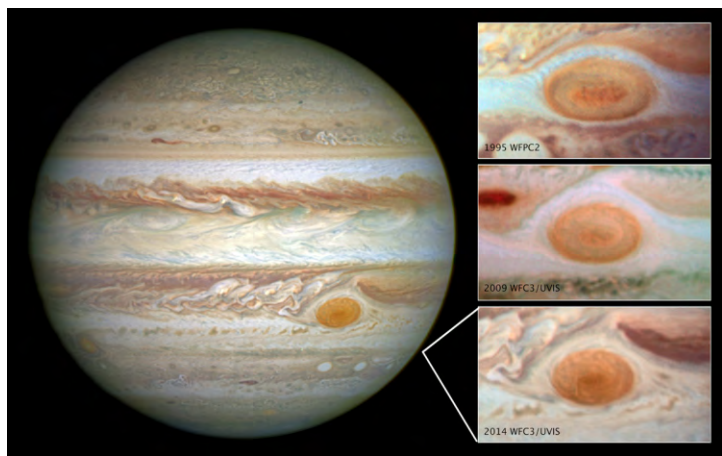
备的目镜中看到的木星云带多半是它们。大红斑北侧所在的南赤道云带向左流动，北赤道云带向右流动。而北赤道云带的上方是北温带云带，它朝左流动，大红斑以南的南温带云带又是向右流动的。在这里我们看到，木星的南赤道云带与南温带云带的移动方向恰好相反，夹在二者中间的大红斑也就因此做快速的逆时针旋转。我们下面专门来介绍木星的大红斑。

木星大红斑 (GRS)

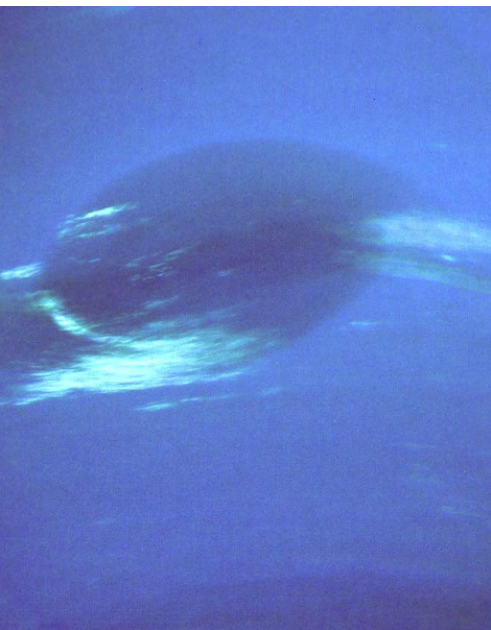
大红斑是木星表面最具代表性的特征之一，位于木星的南半球，南纬22°的位置上。大红斑的纬度非常稳定，南北移动不超过1°。但是，它的经度却是在漂移的，并且漂移速度多年来有显著的变化。一般认为，历史上最早观测到木星大红斑的人是英国的博物学家罗伯特·胡克（Robert

Hooke），他曾在1664年描述过木星上的一个斑点。不过，胡克描述的那个斑点位于木星的北半球，所以有人怀疑胡克看到的并非今日的大红斑。较令人信服的大红斑观察记录来自法国天文学家乔凡尼·卡西尼（Giovanni Cassini），他从1665年开始至1713年一直断断续续用望远镜观测木星的大红斑。如此算下来，大红斑已经在木星大气中存活了超过350年。如前所述，大红斑是逆时针旋转的，周期大约是6个地球日，或14个木星日。大红斑东西长24 000至40 000千米，南北宽12 000至14 000千米，足以放进两三个地球。相较之下，地球上台风的寿命最多只有几十天，云系尺度很难超过2000千米。1979年10月诞生在西北太平洋的台风泰培（Typhoon Tip），环流直径达到了惊人的2220千米，为有气象记录以来的历史之最。

但是，木星的大红斑与地球上台风的成因还不太一样，这主要表现在旋转方向上。地球上的台风是由温度升高导致的一个低压区，台风的外围环流在北半球逆时针旋转，在南半球顺时针旋转（不要问路径跨赤道的台风怎么转。台风的成因决定了它只能向高纬度漂移，不可能跨赤道）。木星与地球的自转方向相同，所以，低压气旋的自转方向应该与地球上的台风一致。但是，木星南半球的大红斑却是一个逆时针旋转



哈勃空间望远镜拍摄到的木星大红斑在收缩。照此趋势下去，大红斑将会在2040年缩成圆形。但是由于近邻喷射气流的畸变作用，这是不可能发生的。因此大红斑是否会在不久的将来消亡呢？



“旅行者2”号拍摄的大黑斑

的反气旋风暴。这说明大红斑是一个由低温导致的高压区。近年来，天文学家在红外波段对大红斑的观测结果也证实了这一结论。

与300多年前大红斑刚被发现的年代相比，今日的大红斑在东西方向上缩水了接近1/2。有人预测大红斑将会在二三十年后销声匿迹。最终大红斑会不会消亡于木星南赤道的云带中？读者不妨对相关的天文观测多加关注。

海王星的大黑斑（GDS）

1989年，当美国航空航天局的“旅行者2”号探测器飞掠海王星的时候，发现海王星的南半球也有一个类似木星大红斑的反气旋风暴，只是它的颜色较四周更深，因而被命名为大黑斑-89。更深入的研究

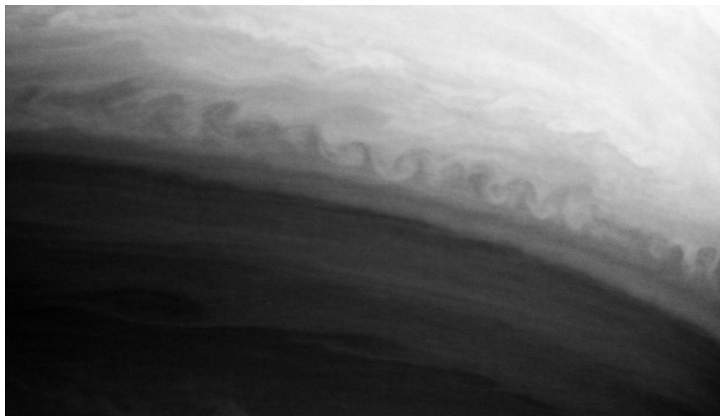
发现，大黑斑的成因与大红斑完全不同，大黑斑本身并不是一个低温风暴，而是海王星大气中的一个巨大的甲烷空洞，类似于地球南极上空的臭氧空洞，只是规模大得多（与地球相当）。大黑斑周围的狂风高达每小时2400千米，是太阳系中风速最快的地方。1994年，当哈勃空间望远镜再度尝试拍摄海王星的大黑斑时，大黑斑已完全消失不见。天文学家不确定它是被遮盖了还是已经彻底消失。然而，另一个几乎相同的斑点又出现在海王星的北半球，这个新斑点被称为北大黑斑（NGDS），被天文学家持续观测了数年之久。

土星与地球大气中的开尔文—亥姆霍兹波（K-H instability）

开尔文—亥姆霍兹波（Kelvin Helmholtz Wave, 简称KH波），取自19世纪物理学家开尔文勋爵和亥姆霍兹。KH波产生的原因是流体力学中所

谓的开尔文—亥姆霍兹不稳定性（K-H instability），这种不稳定性可以发生在速度不同的两种流体之间的交界面上，也可以发生在有垂直切变的同种流体内部。比如，平静的海面上被风吹起的海浪，就是两种流体之间的交界面上产生KH不稳定性的例子。而下图展现的是土星的两条云带之间激发生成的KH波，它属于同种流体内部（主要组成都是氢和氦）因流动速度不同，也就是垂直切变引发的KH不稳定性。

事实上，在地球的云层中也可以生成类似的KH波，只是比较罕见。英国赏云协会的会长加文·普雷特—平尼（Gavin Pretor-Pinney）曾出版过一本小册子叫《云彩收集者手册》，其中就说到，在云彩收集人士的眼中，轮廓分明的KH波就好像皇冠上的明珠，观察到KH波形状的云彩是一件值得炫耀的事。KH波可以看作是波状云的一个罕见变种，通常出现在三种云族的云彩中，即层积云、高



土星的两条云带间的开尔文—亥姆霍兹波



天空中的开尔文-亥姆霍兹波，这是一个极为罕见的波状云变种积云和卷云，有时也能在雾的顶部边缘看到它。当云在下方较冷空气层和上方较暖空气层之间突出的边界处开始发展，并且上层空气比下层流动得快，就会沿着云的表面形成波状云。如果二者的速度差异达到一定临界值，这些波状云就能卷曲起来，形成一连串涡旋，看上去像是冲浪爱好者的理想天堂。在所有情况下，KH波的持续时间都不会超过一两分钟。因此，在纯粹的运气之外，它还要求观云者对天空有敏锐的观察力。

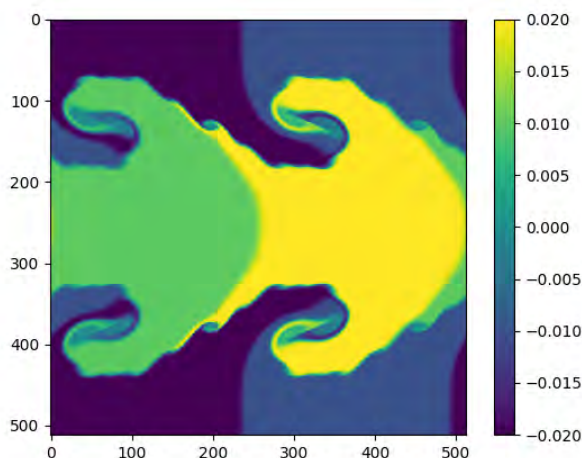
开尔文-亥姆霍兹不稳定性是流体力学中一个研究得比较成熟的现象，可以利用诸如有限体积法(Finite Volume Method)等数值模拟技术在电脑上自动生成一个理想的KH波，然后观察它随时间的演化。笔者就使用有限体积法在一台家用笔记本电脑上模拟产生了

平面KH波在演化过程中的一帧典型图像。中间的黄绿色理想流体从两层蓝色的理想流体之间快速穿过，就像夹心饼干那样，在两个交界面上产生了KH波。可以看到，计算机模拟生成的理想流体的KH波与在土星与地球大气中观察到的KH波极为相似。

土星北极的六边形风暴

1981年，美国航空航天局的“旅行者1”号探测器飞掠土星的时候，在土星北极区意外地发现了一个巨大而规则的六边形风暴。2006年，“卡西尼”号携带的“惠更斯”探测器再度造访土星，拍摄到了更加清晰的六边形风暴特写。近年来，得益于民用CMOS传感器的技术革新和图像处理手段的进步，一些业余天文爱好者已经能够利用太阳光照射土星北半球的机会(即土星北半球的夏季)，在地面上拍摄到较清晰的土星六边形风暴照片。不过令人费解的是，土星的南极点并没有类似的形状规则的风暴。六边形大风暴几乎就盘踞在土星北极点附近，风暴范围一直延伸至北纬 78° 附近。六边形的边长达14 500千米，比地球的直径还大，风暴内部足以装下4个地球。风暴的高度有300千米，边缘附近的气流速度为540千米/时。

对于外形如此规则的巨大风暴，它的成因自然是人们感兴趣的。一个来自牛津大学的



笔者用计算机编程模拟生成的KH波，其中不同颜色的部分代表了流动速度不同的两种理想流体。



“卡西尼”探测器拍摄的土星北半球照片，可以看到盘踞在土星北极点的巨大六边形风暴。

研究小组曾利用一台旋转气缸模拟了土星北极地区的大气环境，成功观察到了三角形、六边形和八边形3种规则风暴，分别对应不同的自转速率。这说明土星北极区的六边形风暴与土星的自转速率有很大关系。

在2012年至2017年，“卡西尼”探测器发现六边形风暴的颜色在发生变化：从先前的蓝绿色逐渐变成了金色。一个理论认为这与土星的季节有关，即暴露在太阳光下的风暴本体有雾霾升起。2017年4月，“卡西尼”探测器结束了自己的土星之旅，进入一条自毁轨道，并于当年9月15日坠入土星大气，此后六边形风暴是否还有颜色上的变化便不得而知了。也许哈勃空间望远镜和地面望远望远镜的观测能延续“卡西尼”探测器的“未竟之志”，继续探索六边形风暴的未解之谜。☞

最 数 字

90% 光速

近日，科学家观测发现一个快速旋转的黑洞，其旋转速度接近90%光速。这个快速旋转的黑洞能够吞噬气体、灰尘和其他天体残骸。来自银河系恒星系统的X射线观测揭示了这个黑洞的存在。分析这些高能量的X射线波，发现这个黑洞的质量大于太阳质量的10倍。据悉，当前仅发现4个黑洞保持着如此快的旋转速度。

100 万个

日前，科学家刚刚激活了全世界最大的“大脑”：一台配有100万个处理器和1200个互连电路板，能够像人脑一样运行的超级电脑。这台费时10年打造的计算机名为“脉冲神经网络架构”，是全世界最大的神经形态计算机，即一类模拟神经元放电的计算机，位于英国曼彻斯特大学。

150 万种

2018年11月1日，一项对全球所有复杂生物体基因组进行测序的雄心勃勃的计划在英国伦敦正式启动。基因变异是所有遗传学知识的源泉，这项地球生物基因组计划的目标便是在未来10年内对全世界约150万种已知的动物、植物、原生动物和真菌物种（统称为真核生物）的基因组进行测序。这项计划估计耗资47亿美元，到目前只筹集到其中的一小部分资金。

7 颗

美国航空航天局的“露西”任务旨在一次研究7颗不同的小行星。在成功通过一次重要评审后，该任务正式获得时间表和预算。“露西”将于2021年10月发射升空，在太阳系内进行为期12年的旅行。一路上，它将拜访小行星带内的1颗天体和特洛伊小行星群内的6颗天体。“露西”任务首席研究员哈尔·莱维森说：“以往这项任务一直是纸上谈兵，但现在我们真正开始动工，准备研制探测器。”