

§ 5.6 太阳系行星

太阳系行星曾是早期天文学的主要研究内容,但随着太空探测技术和天文、物理理论的巨大发展,天文学的主要研究方向逐渐延伸到外太空,即宇宙、星系和太阳系外行星等,而关于太阳系行星的研究逐渐发展成为一门独立的科学,也就是行星科学(de Pater and Lissauer, 2010, 胡中为和徐伟彪, 2008)。相对于天文学的主要兴趣,行星科学更关注行星的大气、地表和内部的化学成分、运动特征、磁场、历史演化等。因此,行星科学研究是天文学与地球科学如大气、海洋、地球物理、地球化学、地质等的交叉学科。

2006 年国际天文学大会将太阳系行星定义为: 1) 围绕太阳公转; 2) 自身引力足够大使其形状为近球形; 3) 在自己的公转轨道上没有其他类似质量天体。根据这一定义,太阳系共有 8 大行星,根据距离太阳的远近分别为: 水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星(图 5.0.1)。冥王星因为公转轨道部分与海王星交错而被降级为矮行星。在这 8 颗行星中,内围的 4 颗行星是固态星球,其质量和体积都比较小,而外围的 4 颗星球是气态星球,其质量和体积比内围固态星球大很多。下面,我们将简要但尽可能全面地介绍太阳系除地球之外的其它 7 大行星在大气、地质、磁场、运动等方面的基本特征,总结目前关于这些行星的主要研究进展,尤其是对这些行星的主要探测项目,提出目前所存在的挑战性研究问题。我们将不对地球做专门的介绍,但会在与其它行星的比较中穿插介绍地球的相关知识。

5.6.1 行星形成

关于太阳系行星的形成,还没有确切的答案。目前被广泛接受的理论是,太阳系源于星云的坍塌而形成的圆盘,圆盘的核心形成了太阳,外围的星云气体和尘埃逐步汇集形成了行星(Wetherill, 1980)。类地行星是通过太阳系星云中的尘埃逐步汇集形成较大的颗粒,颗粒碰并增大质量,形成星子,再通过引力更快地吸收周围的物质从而形成原始的行星。原始行星在引力的作用下吸引周围的气体,形成行星的原始大气。这些原始行星围绕太阳运动,有可能通过与其它原始行星碰并形成更大的行星,或者在碎裂之后被其它较大的行星吸收。那些没有被碰并的原始行星有可能变成行星的卫星或者是星际之间小的星体。

在行星形成的过程中,距离太阳较近的区域温度较高,易气化的物质都在高温下挥发,仅留下岩石和金属类的物质,这些密度较大的物质经碰并逐步汇集形成了固态行星。这些固态星球的大气层最初可能是由 H_2 和 He 组成,但强烈的太阳风很快把这些原生大气吹走。

在行星形成的早期,一些分子量较大的气态物质储存在固态行星内部,这些气态物质逐步从固态星球内部,后来通过地质活动释放出来,形成次生大气。在太阳系外围,温度相对较低,水和其它易挥发物质如氨等以固态形式存在,这些物质形成气态星球的核,当这些核的质量快速增长,在引力的作用下,这些气态星球的核心能够不断吸引周围分子量较小的气体(如氢和氦),从而形成巨型气态星球,宇宙大爆炸形成的主要成分 H_2 和 He 则构成了这些星球的大气层。固态和气态星球的范围由所谓的“雪线”分离开来。在太阳系,“雪线”位于火星和木星之间,因此,内围的 4 个星球是固态的,而外围的 4 个星球是气态的。现有的数值模式可以近似地模拟太阳系行星的形成。图 5.7.1 给出的是太阳系固态星球最后形成阶段的数值模拟结果(Raymond et al., 2006),也就是从行星胚胎到行星形成的这一阶段,包括行星胚胎之间的碰并和对体积较小的行星尘埃的吸集。该模拟工作很好地给出了金星、地球、火星距离太阳的位置和质量以及含水量。需要指出的是,随着大量太阳系外行星的发现,人们发现恒星周围行星的形态和分布与太阳系行星并非完全类似。例如,现在发现很多与木星类似的巨型气态星球距离其恒星很近,也就是所谓的热木星。因此,太阳系恒星周围行星的形态和分布是多样化的。

5.6.2 水星 (Mercury)

水星是一颗固态星球,是 8 大行星中距离太阳最近的,也是体积和质量最小的行星(Matthews et al., 1989)。其平均密度是 5.427 g cm^{-3} ,在 8 大行星中仅次于地球的平均密度(5.515 g cm^{-3})。据此推测,水星应含有丰富的铁。行星地质学家估计,水星的核很大,占水星总质量的 42%(地核只占地球总质量的 17%),主要由融化了的铁和其它金属组成。其核心的外面有一层大约 300-500 km 厚的幔,然后是 100-300 km 厚的壳。因为拥有一个巨大的液态铁核,水星有磁场。根据“水手 10 号”宇宙飞船的测量,水星磁场在其赤道的强度大约是地球的 1.1%。其磁场之所以较弱,可能与水星自转较慢有关。与地球的磁极不同,水星的磁极与其地理意义上南北极几乎是重叠的。虽然水星的磁场较地球的磁场弱得多,但足以产生较强的磁层使太阳风不直接接触水星。

水星的公转周期大约是 88 天(地球天),其自转周期大约是 58 天,自转轴倾角大约是 0.027 度。水星的大气层几乎可以忽略不计,只有 10^{-14} 个大气压。一般认为,这是因为水星的质量太小,而且地面温度太高其引力不足以维持大气层的存在所导致的。探测表明,水星具有一个显著的大气逃逸层,其主要成分是氢、氦、氧、钠、钙、钾、水蒸汽和一些分子离子。由于没有大气层,又由于水星的自转很慢,所以,向阳和背阳的温差以及赤道与极地的

温差都极大,向阳一侧在近日点地面温度可以高达 700 K, 而背阳一侧的温度则只有 110 K。虽然其向阳一面温度极高,但其两极地区的陨石坑底部仍很难见到阳光,温度很低。观测表明,在这些陨石坑里可能有水冰存在。这些水冰很可能来源于水星内部水的排放以及彗星撞击留下的水(水冰是彗星的主要成分)。

到目前为止,两艘宇宙飞船对水星进行了探测。一艘是 1973 年 11 月 3 日由 NASA 发射的“水手 10 号”,该飞船于 1974 年 3 月底第一次飞经水星,与地球的联系在 1975 年 3 月 24 日中断。“水手 10 号”宇宙飞船的主要发现是:水星的大气层极为稀薄,地表布满了陨石坑,其向阳一面的温度高达 187 °C,背阳一面的温度低至-183 °C,水星具有显著的磁场,并对大约 45%的水星表面进行了拍照。另一艘是 2004 年 8 月 3 日发射的“信使号”,其重要发现之一是水星磁场存在扭曲的磁力线管。“信使号”仍在围绕水星运行,将在 2013 年完成使命。

5.6.3 金星 (Venus)

金星位于地球和水星之间,其体积、质量和密度均与地球很接近 (Bougher et al., 1997)。其自转速度非常慢,自转周期大约是 243 天(地球天),但其自转方向与其它星球相反,自东向西旋转,因此,其自转轴倾斜度是 177 度。金星的公转周期与其自转周期接近,大约是 225 天。观测表明,金星没有磁场,这很可能与其极慢的自转速率有关,因为通常认为一个行星的自转有助于带动其核心的液态金属物质运动并产生磁场。我们对金星的内部结构所知甚少,根据金星与地球的相似性,一般认为金星同样有一个金属组成的核心,其半径很可能达 3000 km。但由于金星没有磁场,所以,目前并没有关于金星拥有金属核心的直接证据。金星的表面由干燥的岩石组成。图 5.7.2 给出的是前苏联发射的“金星 13 号”着陆器拍摄的金星表面照片,能够看到堆积的岩石和颗粒物。与其它固态星球一样,金星的表面也有陨石撞击的痕迹,但陨石坑均大于 1.5 km,这很可能是因为金星厚密的大气层降低了较小的陨石的下落速度,或者较小的陨石在厚密的大气层中焚毁了。观测表明,金星的地壳没有板块运动,但却有比地球更活跃的火山活动。金星的最高的山峰高达 11 km,比地球最高的山峰(8.8 km)要高。

金星大气层厚重而又浑浊(图 5.7.3),表面大气压力大约是 95 个大气压,CO₂ 含量占 96%。金星的行星反照率高达 0.78,这主要是因为大气中的硫酸盐气溶胶及其与少量水汽结合形成的云层能对太阳辐射产生很强的散射和反射。根据辐射能量平衡原理,可以计算出金星地表辐射平衡温度大约是 240 K。可是,前苏联发射的“金星号”系列探测在金星表面着

陆，确认了金星表面温度高达 730 K（超过了铅和锌的熔点）。观测表明，只有大约 2% 的太阳辐射能够透过金星大气到达金星表面，因此，金星表面的高温主要是由于金星大气高 CO_2 含量产生的强的温室效应造成的。虽然金星的自转很慢，但其风速很大，赤道上空的东风风速高达 100 ms^{-1} 。

金星大气极高的 CO_2 含量是金星气候演化的结果，而金星的气候演化通常被作为固态星球气候演化过程中出现极温室逃逸的例证（Ingersoll, 1969, Pierrehumbert, 2010）。关于金星的气候演化，现在被广泛接受的理论是：早期金星表面可能有液态水甚至海洋存在；但因为金星离太阳距离近，其表面温度比地球高，从而使得更多地水汽进入大气；在水汽正反馈的作用下，其表面温度将超过极端温室效应的阈值（粗略估计是 340 K），使得液态水完全蒸发并进入大气；进入大气平流层的水汽被太阳紫外辐射光解，形成氢和氧；氢原子逃逸到太空，氧则与其它物质发生化学反应形成氧化物，最终结果是金星失去了早期海洋。一个有力的证据是“先锋号”飞船观测到金星大气中氢的同位素氘与氢的比例是 1.9×10^{-2} （地球海洋中两者的比例大约是 1.6×10^{-4} ），意味着金星大气中较轻的氢同位素比较重的逃逸更多，说明了金星大气中确实存在较轻的氢同位素大量逃逸的事实。

当液态水完全蒸发之后，在没有液态水的环境下，大气中的 CO_2 无法与地表岩石发生风化反应，其结果是火山喷发出的 CO_2 完全累积在金星大气中，使得金星大气中 CO_2 的分压高达 95 个大气压。图 5.7.4 给出了在没有液态水的条件下，金星大气缺乏有效的碳循环机制来稳定金星气候的简单示意图。 CO_2 由于火山活动被喷发到大气中后将永久性地留在大气中；水汽一旦被光解，氢原子将永久性地逃逸到太空； SO_2 一旦与其它矿物质发生化学反应，将永久性地堆积在金星表面（仅有一少部分与大气中微量的水汽之间存在可逆的化学反应）。部分 SO_2 与大气中的水汽结合形成硫酸云，因此，金星大气非常浑浊。相对于金星的气候演化，地球因为有液态水存在，以上的过程都是可逆的，尤其是在液态水的作用下， CO_2 可以与地面硅酸盐岩石发生风化反应。虽然火山喷发不断地向大气中释放 CO_2 ，但风化反应不断地降低大气中的 CO_2 ，从而使地球大气中 CO_2 维持在一个较低的水平，地球气候也保持在一个比较温和的水平。

人造飞船和探测器对金星的探测仅次于对火星的探测。前苏联在 20 世纪 60-80 年代向金星发射了一系列“金星号”系列飞船和探测器，其中 9 次是成功的，对金星大气成分、地表温度、磁场、和带电粒子进行了测量，并多次成功释放着陆探测器，发回了大量的金星表面照片（图 5.7.2）。美国自 20 世纪 60 年代开始也向金星发射了一系列探测器，包括“水手号”系列和“先锋号”等。欧空局于 2006 年发射了“金星快车号”，主要目的是探测金星的

大气环流。日本于 2010 年发射了“金星气候轨道飞行器”，但没有进入正确的轨道。

5.6.4 火星 (Mars)

在太阳系各行星中，火星的自转速度和自转轴倾角都与地球的最为接近(Matthews et al., 1992,)。火星表面呈红褐色(图5.7.5)，这是因为其表面土壤含有丰富的氧化铁(铁锈)。火星两极的白色物质为CO₂干冰和水冰的冰盖。因为火星的冬半球温度极低，低于CO₂凝固成干冰的温度(在6 hPa大气压的条件下大约是-123℃)，所以，在火星的两极冠区有长年存在的水冰和干冰冰盖，也就是图5.7.5中两极地区的白色物质。有证据表明，火星早期气候环境可能与地球相似，有液态水并适合生命的生存。因此，研究火星可能为理解地球气候系统和地球生命的演化进程提供最佳参照。火星是目前研究最为广泛的星球，目前有关火星研究的重要问题包括：决定现代火星气候变化的物理过程、火星表面的地质、化学甚至生命活动的信息、火星在10至1000年时间尺度上的气候变化及其原因、火星极区冰冠的形成、火星早期的气候及其是否适于生命存在、火星环境的历史演化和确定火星大气逃逸和火星内部排气的物理化学过程。

火星是目前人类探测次数最多，也是探测最为广泛的行星。在过去几十年，美欧苏等国家已发射了一系列火星探测器，这些探测提供了火星地形、地质结构、表面矿物质和元素成分、近表面水分布、残余磁场、重力场和壳层结构和大气成分等的系统信息。这探测告诉了我们水在火星演化历史上扮演了重要的角色。这其中最为重要的是 2003 年发射的可在地球遥控的“机会号”、和“勇气号”(图 5.7.6)。两辆火星车的设计寿命是 90 天，但它们在火星表面的实际运行时间远超过其设计寿命。“勇气号”在 2010 年 3 月 22 日停止与地球的通讯，实际距离 7.73 km，远超过设计的运行距离 600 m。“机会号”至今还在工作，其运行距离已超过 34 km。为了加强对火星的研究，NASA 和欧空局等还计划在近期向火星发射一系列的探测器。图 5.7.7 是“勇气号”火星车拍摄的火星地表的照片，火星表面的沙砾和岩石都清晰可见。

火星的半径大约只有地球的一半(3380 km)，其体积和质量分别只有地球的15%和11%，平均密度也较地球的小，大约是3.93 g cm⁻³。现有的探测表明，火星拥有一个铁核，半径大约是1800 km，主要含有铁和镍，还有大约16-17%的硫。核心的外面大约2000 km厚的地幔，主要成分是硅酸盐，然后是平均大约50 km厚的地壳，最厚的地壳达125 km(地球地壳的平均厚度大约是40 km)。火星表面最深的低地是Hellas低地，低于地平面8 km，很可能是由于巨型陨石撞击留下的巨型陨石坑。火星拥有太阳系最高的山峰，奥林帕斯火山，高出地平面

12 km。火星的南北半球并不对称，南半球的地势较高，而北半球地势较低，所以，火星的形状呈“梨”型。北半球主要是平原，一些学者甚至认为北半球曾经被洪水冲刷过。现在火星并没有磁场，但“火星全球观测者”的观测表明火星地壳中金属物质曾经被磁化过，并且出现过磁极反转，这些被认为是早期火星存在磁场的证据。为什么火星的磁场消失了？现在还没有答案。

火星大气非常稀薄，其地表大气压大约只有6-8 hPa，大气主要成分同样是CO₂（96%）。由于大气稀薄，火星地表很冷，平均温度大约是-60 °C。火星表面的风速一般小于2 ms⁻¹，但阵风很大，可以达到40 ms⁻¹，并产生沙尘暴。火星平流层风速比地球的大得多，高达120 ms⁻¹（地球平流层风速一般不超过80 ms⁻¹）。火星大气环流与二氧化碳循环、水循环和沙尘循环是密切耦合在一起的。大气运动卷起沙尘，而扬起的沙尘反过来影响大气辐射传输和热力场，进而影响火星大气运动。在夏半球，在太阳光照射下，地表升温，大气被加热后产生上升运动。另外，地表干冰由于温度的升高而升华进入大气（CO₂基本是从固态直接转换成气态，很少以液态的形式出现，因为液态CO₂存在的温度-压强相空间非常小），并通过哈德雷环流被输送到冬半球，一部分在那里凝固成干冰降落到地面，另一部分以干冰云形式留在大气里。这种火星季节性极冠区二氧化碳相变，并在哈德雷环流的作用下形成了二氧化碳在两半球之间的质量迁移，使两个半球的大气压力呈现周期性变化（Leovy, 2001）。

早期火星气候是否曾与地球一样温暖？是否曾有液态水存在？是否曾有生命存在？这些问题一直是火星研究的热点。图5.7.8是1984年12月27日在南极发现的一块被认为是来自早期火星的陨石（编号为：ALH84001），其表面有原始微生物的特征，一些学者据此认为在火星的早期曾有原始生命存在（McKay et al., 1996），它也意味着火星的早期气候可能曾经像地球那样温暖，并曾有液态水存在。过去的十年里，许多探测证据（包括高密度的河流系统、三角洲沉积、静态水体沉积物和蒸发矿物等等）表明，远古火星可能曾拥有温暖和湿润的环境。但也有相反的观点认为即使在火星的早期，其气候也是寒冷和干燥的。

如果火星早期气候比现在温暖，因为早期太阳辐射较弱，火星早期大气的温室效应必须比现在强，也就是说温室气体的浓度或大气压或两者均比现在高得多，迄今为止的理论工作不能成功产生高于冰点的早期火星表面温度。这一问题与地球气候演化中的“暗弱太阳问题”本质类似，也都是当前的热点科学问题。关于早期火星大气，一种理论认为早期火星的磁场有助于减弱太阳风对火星大气的剥蚀作用，从而使得古火星得以保持较稠密的大气。而当火星磁场减弱之后，火星大气逃逸，从而引发了前述的气候变化。但是，迄今为止所有的数值计算都不能支持从38亿年以来火星大气逃逸是其气候变化的原因这一说法(Tian et al. 2009)。

寻找火星上是否曾存在液态水一直是行星科学家们的巨大兴趣。NASA于2003年发射的“勇气号”和“机会号”火星探测车为火星曾存在液态水提供了有力的证据。探测表明，在35亿年前火星表面的液相化学呈酸性，并在古老的地层中发现了局部的碳酸岩，而碳酸盐岩石的形成需要液态水，说明火星早期确实曾经温暖而且湿润。如果火星上存在全球性的古代碳酸岩沉积，古火星的环境可能曾适合生命的存在。NASA预计于2013年发射的MAVEN探测器，将用于探测火星的高层大气，它将有利于加强我们对火星演化历史的理解。

最近人们发现火星大气中存在较多的甲烷。由于甲烷在火星大气里的光化反应时标约为300年，如果有关火星大气甲烷的发现被未来的行星探测计划证实，某种快速产生甲烷的地下过程（火山、地热、地球化学或生物活动）正在火星上发生。NASA和ESA正在计划于2016年发射火星大气痕量气体观测任务来测量关键痕量气体及其同位素在大气中的成分、含量和变化，从而验证有关甲烷起源的假说。虽然对火星地下生命的确凿无疑的验证工作需要等待样品返回计划的实施，但研究火星大气中的甲烷和其他痕量气体并验证火星大气甲烷的探测将有助于最终回答火星大气甲烷是否是由地质过程还是由生命过程产生这一问题，因此是一项非常重要的工作。

5.6.5 木星（Jupiter）

木星是太阳系行星中体积和质量最大的行星（图 5.7.9），木星的质量是地球的 318 倍，是太阳系其它行星质量总和的 2.5 倍（Bagenal et al., 2007）。其大气成分主要有氢和氦组成，二者所占的质量分别是 75%和 24%，还有一些其它微量气体。在木星的内部，氢和氦所占的质量分别为 71%和 24%，另外的 5%是甲烷、水气、氨和硅化合物。木星大气中氢和氦的比例与理论估计的太阳原始成分非常接近。由于其巨大的质量，木星在自身重力的作用下会产生重力坍塌现象，体积不断收缩，并产生热量。内部释放的热能与木星接收到的太阳辐射能量相当。相对而言，固态星球的地热几乎可以忽略不计。

关于木星的内部结构，现在还不是非常清楚。一般认为木星有一个由岩石和冰组成的核，其质量占木星质量的 10%左右。也有人认为木星没有固态核。初步估计，木星核心的温度高达 36000 K，压力高达 4.0×10^7 个大气压。木星核的外围是一层液态的具有金属特性的氢和部分氦组成，其厚度占木星半径的大约 78%。氢之所以具有金属特性是因为巨大压强的结果，也正是因为巨大压力下氢的金属特性（Nellis et al., 1996），木星具有磁场。其磁场很强，大约是地球磁场的 14 倍。在这一层金属性氢的外面，有一层很难区分气态和液态的氢超级流体。木星有一个较昏暗的光环，其成分是由一些尘埃组成，不像土星的光环是由冰

组成。木星至少拥有 66 颗卫星，是太阳系拥有卫星最多的行星。

因为木星的大气层与其下面的液态物质没有明确的分界，所以，人们通常认为木星的大气层是从 10 个大气压到大气层顶。木星大气的温度在 100 hPa 以下随高度升高而递减，类似于地球大气的对流层。由对流运动造成的氨气和水汽所凝结成的云层分别分布于 1~3 个大气压以及 5~10 大气压。由局部强对流所生成的强风暴和闪电也在最近被观察到。在 100 hPa 之上，木星大气温度随高度升高而升高，出现逆温层，这是由于由甲烷光解后生成有机气溶胶吸收太阳辐射造成的。

木星大气的重要动力学特征是多急流和涡旋。木星大气在每个半球都有许多东西风交替的急流带。木星的赤道上空有强的西风急流，也就是所谓的超级旋转，最大风速分别为 100 ms^{-1} 。在中高纬度区域，木星的東西風交替的急流分別對應於觀測到的亮暗交替的雲帶。除了非常强的急流，木星的大气层中还有很多不同尺度、颜色和旋转方向的涡旋。其中最著名的涡旋是大红斑。这个太阳系中最大的涡旋可以装下 2-3 个地球，并且已经存在了至少 346 年（由 Robert Hooke 于 1664 年首次观测到，而非伽利略首次观测到的（Lodders and Fegley, 1998））。木星多急流和多涡旋的大气环流特征是由于其快速自转造成的（Ingersoll, 1990）。急流之间强的风切变导致气流不稳定和尺度较小的涡旋产生，小尺度的涡旋逐步把能量向尺度较大的涡旋汇集，最终形成大红斑，整个过程可以根据二维湍流中能量从小尺度到大尺度汇聚的逆串级理论来解释（Rhines, 1975, Ingersoll et al., 1990, Marcus, 1993）。

目前，大致上有两种模型被用于解释木星和土星等大气急流的形成机制和垂直结构：深流体模型和浅流体模型。深流体模型假设巨行星大气中的风是由行星内部发出的热能驱动的（Busse, 1976），这是因为木星在快速自转和大气粘度很小的情况下，流体的流速和气压梯度沿自转轴的方向保持不变（Taylor-Proudman 原理）。所以，大气中的对流单体是平行转轴方向的细柱状结构，对流单体之间的相互作用形成了嵌套在一起、以转轴为中心、并且平行于转轴的柱状结构，这些转速不同的柱状结构相互作用形成了在木星和土星大气中观测到的纬向急流。浅流体模型假设纬向急流是由气流的湍流生成的，或是由行星受到的随纬度变化的太阳辐射生成的。由于科氏力参数随纬度的变化，快速转动的二维湍流不是各向同性的（Rhines, 1975）。因此，在湍流动能由小尺度向大尺度传播的过程中，沿纬向的大尺度被随纬度变化的科氏力参数限制，而沿经向的大尺度不被限制。所以，小尺度湍流倾向于形成纬向急流。二维模型可以大致解释木星大气中高纬度的东西风交替的急流，但无法模拟在木星和土星大气中观测到的赤道超级旋转急流。

目前所观测到的木星大气运动主要是气云层之上的风向和风速，对于云层下面的风向以

及风速,所知甚少。“伽利略号”宇宙飞船所携带的探测器被抛入木星大气之后,测量到 6.4°N 附近纬向风风速从 0.7 个大气压处的 90 ms^{-1} 增加到 4 个大气压处的 170 ms^{-1} , 然后维持不变直到大约 20 个大气压。“伽利略号”探测器仅测量了不到巨行星半径 1% 的纬向风的垂直结构,我们目前还不知道观测到的行星表面纬向风是一直延伸到行星的内部,还是在云层下就很快消失了。

NASA 向木星发射了一系列的宇宙飞船和探测器。“先锋 10 号”是第一个访问木星的宇宙飞船,它于 1973 年经过木星飞向太阳系的边缘。“伽利略号”是第一个进入环绕木星轨道的宇宙飞船,从 1995 到 2003 年,该飞船对木星进行了长期的观测,它探测到了闪电并且给出了闪电分布图,“伽利略号”还第一次把探测器抛入木星的大气层,探测器测量了木星外大气层(深达 22 个大气压)中的温度和风速。“卡西尼号”于 2000 年底经过木星,正飞往冥王星的“新地平线号”也飞越了木星。NASA 于 2011 年 8 月发射的 Juno 飞船将于 2016 年抵达木星,该飞船的主要目的是为了研究木星的形成、演化、大气深层结构和磁场等,该探测计划将有望大大地提高我们对木星以及其它巨行星的认识。

木星系统的卫星中,最早为人类发现的是被称为伽利略卫星的四颗大卫星。其中木卫一因为受木星引潮力影响,内部成熔融状态,表面遍布活火山活动;木卫二和木卫三表面完全由冰雪覆盖,而内部有巨大的海洋;而距离木星更远的木卫四则完全是个固态冰卫星,表面有古老的陨石撞击坑。对木卫二内部海洋是否有生命的猜测由来已久,很可能是美国和欧洲下一步太阳系深空探测计划的主题之一。

5.6.6 土星 (Saturn)

土星是太阳系质量和体积第二大的行星(图 5.7.10),其化学成分与木星类似,主要由氢和氦组成(Gehrels & Matthews, 1984)。土星的平均密度很小,只有 0.69 gcm^{-3} ,甚至比水还轻。由于其快速的旋转,土星的赤道半径比其极地半径大 10%,大约是 60268 km 对 54364 km,是太阳系最为扁平的行星。土星拥有壮观的环和至少 62 颗卫星。

土星拥有一个固态的核,主要由铁、镍和硅的氧化物组成,其半径大约是 13000 km,土星核心温度高达 12000 K。与木星一样,在重力的作用下,土星向内收缩产生巨大的热量释放,向外辐射的热能超出其接收的太阳辐射能量的 2 倍。土星内部较重的物质例如氦的沉降也产生部分热能。土星核的外面有一层金属氢和饱和了的氦所包围,然后是一层液态的氢,之后向气态的氢和氦过渡。土星与木星一样也有磁场,两极地区有极光出现。土星磁场也是由于在土星的深层,巨大的压力导致氢呈液态,并具有金属特性,液态金属氢的流动产生了

磁场，土星的磁场强度比地球的稍弱一些。

土星大气包含大约 96.3%的氢和大约 3.25%氦（体积比或者分子数之比），这一比例大大高于太阳大气中氢与氦的比例，主要因为大量的氦沉降到土星的内部。土星大气还包含有一些痕量气体，如氨、甲烷等。在土星大气的高层（0.5 – 2.0 个大气压），温度大约是 100-160 K，云层主要由氨冰组成。水冰主要形成在土星大气的下层（2.5 – 9.5 个大气压），那里的大气温度大约是 185 – 270 K。在 10 – 20 个大气压这一层，大气温度大约是 270 – 330 K，云层主要是液态水滴以及氨溶解于水形成的液态云滴。在土星大气的高层，太阳紫外辐射导致甲烷等气体光解，生成有机气溶胶。这些气溶胶吸收太阳紫外辐射，形成土星高层大气的逆温层。

土星大气的一个显著特征是风速很大，赤道西风急流速度高达 500 ms^{-1} ，是太阳系行星风速最大的，常常被作为超级旋转气流的典型。与木星一样，土星大气也呈现多急流和涡旋的特征，这些特征可以从图 5.7.10 看到。但与木星相比，土星云系所体现出的急流带和涡旋没有木星大气急流带和涡旋那样剧烈，只是急流带较木星大气急流宽。土星大气有时会出现持续时间很长的白色涡旋。哈勃望远镜曾于 1990 年观测到赤道附近有白色涡旋云系（大白斑），而“旅行者号”飞船在 1994 年并没有观测到这一现象。土星赤道附近的大白斑大约每 27 – 30 地球年（相当于土星的大致一年）在其北半球夏至的时间出现一次，过去曾在 1876、1903、1933、1960 年观测到过。如果它确实具有周期性，下一次出现应该在 2020 年。“卡西尼号”飞船观测到土星在 2010 年 12 月 5 日爆发了一个超级风暴，爆发两个月后，超级风暴环绕了整个土星，在风暴最强时，每秒钟大约有 10 次闪电产生。与地球大气一样，土星大气的两极也存在极地涡旋。但不一样的是，土星大气北极的涡旋成稳定的正六边形(图 5.7.11)，而非圆形，涡旋的旋转速度与土星的自转速度相同，什么原因造成土星北极涡旋的正六边形形状目前还不太清楚。土星的南极涡旋并非正六边形形状，涡旋的边缘有急流，中心是一个暖性的核心，而非像地球两极的涡旋均是冷低压，这很像地球上的台风涡旋，其中心是一个热核。

土星最显著的特征是其周围的光环。该光环从距离土星 6630 km 延伸到 12 万 km，平均厚度大约 20 m，主要由水冰颗粒组成，冰晶颗粒的直径从小的尘埃到大约 10 m，还有一部分其它物质。土星的光环在太阳光的照射下显得非常明亮。在距离主光环 1 千 2 百万公里的地方还有一个比较昏暗的光环。到目前为止，还没有关于土星光环起源和形成的确切理论。

NASA 向土星发射了一系列飞船和探测器。“先锋 11 号”是第一个访问土星的宇宙飞船，

它于 1979 年 9 月飞经土星，拍摄了许多照片，发现了土星光环中间一些看起来昏暗的带在太阳光角度合适的时候其实也是明亮的。“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”宇宙飞船分别在 1980 年 11 月和 1981 年 8 月飞经土星，对土星的卫星进行了探测。“旅行者 1 号”还对土星的第 6 颗卫星（土卫六）进行了短暂的观测，“卡西尼号”宇宙飞船对土星的南极涡旋、闪电、赤道纬向风的变化以及土星大气的季节变化进行了详细的探测。“卡西尼号”宇宙飞船的观测还为土星的卫星系统的研究提供了大量的珍贵资料。

值得指出的是，土卫六是目行星科学研究的一个热点。土卫六是土星最大的卫星，它的体积甚至比水星还要大（半径大约是 2500 km）。与其它太阳系卫星不同的是土卫六拥有相当厚的大气层，地表大气压力为 1.467 个大气压。土卫六大气的重要成分是氮气，占大气总质量的 95%，其余为甲烷。为什么一个质量比火星还小的卫星能够拥有比地球还厚重的大气层，而火星只有很稀薄的大气层，这至今还没有确定的答案。土卫六大气层丰富的氮气最初很可能是由于氨气分解而来，因为氨气很容易光解为氮和氢，当氢逃逸向太空后，留下的氮气成为土卫六的主要成分。在太阳紫外辐射作用下，土卫六大气中的甲烷大约在 100 万年的时间内就可以被完全光解掉。因此，一定存在一个甲烷的生成源，现有的估计是甲烷来自土卫六内部的排气过程。“卡西尼”宇宙飞船已探测到甲烷自土卫六内部喷发出来的情景。土卫六的密度相当小，只有 1.88 kgm^{-3} ，因此，它的固体核应该主要是由冻结的甲烷、氨和水冰等组成的。

土卫六大气高层有一层烯类橙色的有机气溶胶（霾）。这层有机气溶胶能够吸收太阳短波辐射，造成表面温度降低，通常称为“逆温室效应”，在大气高层形成逆温现象。这些有机气溶胶应主要是甲烷和氮气光解后，经过一系列化学反应生成长链有机分子，并逐步合并成气溶胶颗粒。“卡西尼”抛入土卫六大气层的“惠更斯”探测器观测到了这些气溶胶颗粒。土卫六的表面温度大约是 -178°C （95 K），低于甲烷等的凝结温度。因此，土卫六的表面有液态甲烷存在。“卡西尼”飞船确实发现土卫六表面有甲烷等碳水化合物的湖泊和河流存在的迹象（图 5.7.12）。“卡西尼”飞船还发现土卫六大气层中存在强的对流运动风暴等“天气现象”，伴随风暴的是液态的甲烷“雨”降到地面，蒸发后又返回大气中。

与金星类似，土卫六的自转速度比较慢，自转周期大约是 16 地球天，所以，在很多方面，土卫六大气的环流特征与金星可比较。“卡西尼”和“旅行者”飞船测量的土卫六的纬向风高达 100 ms^{-1} ，在平流层，风速甚至高达 160 ms^{-1} 。与金星一样，土卫六大气也具有超级旋转现象。与金星大气不一样的是，土卫六大气运动有很强的季节性，这是由于金星地表温度主要是由大气的温室效应决定的，而非由太阳辐射决定的。土卫六的对流层顶高达 40 km，

有利于垂直对流运动和丰富“天气现象”以及风暴的发生。伴随着风暴活动，有两种“降水”发生，一种是较缓慢和较重的有机气溶胶粒子，另一种是液态甲烷等。“卡西尼”飞船甚至观测到了闪电的发生。

土卫六是目前所发现的除地球以外唯一表面有液态流体的星球。液态流体为那些需要液态物质作为循环载体的生命提供了必要的生存条件，其丰富的氮气也是生命所必需的元素。土卫六的气候环境是否适于生命(至少是厌氧生命)的存在一直是人们关心的一个重要问题。土卫六大气的成分有可能与早期地球大气成分类似，因此对土卫六大气逃逸、大气化学和气候的研究对理解早期地球大气、生命起源和早期演化有重要意义，所以，是当前国际上土卫六研究的热点之一。

美国宇航局的卡西尼计划的一个重大发现是活跃的土卫二南极喷泉。据估计，喷泉的出口速度可能高达 1 公里每秒。喷泉不仅为土星环和卫星系统提供了大量的水冰，使得部分土星环得以形成和维持，还为土卫二内部存在液态水的假说提供了有力的支持。因为土卫二半径仅有 250 公里，在其内部存在液态水使得液态水在太阳系内的分布范围得到巨大的扩展，这在人类对自然界的认识方面是一个很大的进步。

5.6.7 天王星 (Uranus)

天王星从体积来讲是太阳系第 3 大行星，但其质量却比海王星要小，所以，从质量来讲是第 4 大行星。它的质量是地球的 14.5 倍，半径是地球的大约 4 倍，密度是行星中第 2 轻的，仅次于土星 (Matthews et al., 1991)。初步估计，天王星的核也由铁、镍和硅的化合物组成，核心压力大于 800 万个大气压，温度高达 5000 K。核的外面包围一层冰质的“幔”，主要由水、氨、甲烷等物质组成，其质量占天王星质量的 90%以上。但这里的冰并非传统意义上的冰，在巨大的压力下，这些物质更趋近于液态性质，并具有电导性。因此，天王星和海王星也被称为冰行星，而非像木星和土星那样的气态星球。“幔”层的外围是有氢、氦和甲烷所组成的大气层，其质量只有天王星总质量的 3%。虽然天王星也具有巨大的质量，但其地热却比地球的还弱，而与其质量类似的海王星却具有显著的地热，目前还无法很好地解释为什么天王星缺乏地热。由于具有金属性的物质，天王星也具有磁场，但其磁极与地球、木星和土星非常不同，其磁北极偏离南极点高达 59 度，磁场中心与其行星的中心并不重合，偏向北极 (Holmer & Bloxham, 1996)。天王星的自转轴的倾角大约是 98 度，基本上是南半球夏季时，南极正对着太阳，而北半球夏季时，北极正对着太阳。

天王星的大气成分与木星和土星类似，主要氢和氦组成，但大气的甲烷含量比木星和土

星要多得多。高层大气的甲烷被太阳紫外光解后生成有机气溶胶，这些气溶胶吸收太阳的紫外辐射加热大气高层，形成逆温层。天王星大气有着几层不同成分的云层，在 2 个大气压的地方，大气温度大约是 100 K，云层主要是甲烷冰晶。在 2 - 20 个大气压的这一层，温度大约在 100 - 200 K，云层主要是氨和硫化氢，水云位于大约 40 个大气压的高度。早期的观测几乎没有从其云系的变化观测到大气运动的特征，因此人们认为天王星大气的动力学特性很弱。直到“旅行者 2 号”飞经天王星，人们才发现天王星也具有活跃的动力学特性。天王星大气在赤道地区是东风，这一点与木星和土星不同，风速达到-100 至-50 ms^{-1} ，在中高纬度转变为西风。

“旅行者 2 号”宇宙飞船是迄今为止唯一访问过天王星的人造飞行器。它于 1977 年发射，于 1986 年 1 月 24 日抵达天王星。在飞往海王星之前，“旅行者 2 号”探测了天王星的大气成分、大气结构和磁场等。

5.6.8 海王星 (Neptune)

海王星是太阳系距离太阳最远的行星，距离太阳大约 30 个天文单位，其质量大约是地球的 17 倍 (Cruikshank, 1995)。与其它行星的发现过程不同，海王星并不是首先通过观测发现的，而是根据计算预测的结果再进行观测发现的 (Littmann and Standish, 2004)，这是天文学界理论指导实际的典范。

海王星的化学成分与天王星类似，除了主要由氢和氦组成之外，还包含相当可观的水、氨和甲烷等成分，这一点与木星和土星不同。因为水、氨和甲烷在较低的温度下更容易以固态形式（冰）存在，所以，海王星和天王星有时也被称为“冰态巨行星”，用来区别木星和土星。海王星也有一个由铁、镍和硅化合物组成的核，其中心压力有 7 百万个大气压，温度大约是 5400 K。核的外围是海王星的冰质“幔”，其质量占海王星总质量的大约 88%，含有大量的水、氨和甲烷。这些物质在高温高压下呈现流体性质，并且具有电导性，这些流体随星球的自转运动产生磁场。与天王星一样，海王星的磁场中心与星球的质量中心并不重合，而是偏离质量中心约 0.55 海王星半径。现有的理论认为，海王星和天王星磁场中心偏离星球质量中心的原因是因为这两个星球的磁场是由于其“幔”层电导性流体产生的，而非其核心产生的。海王星的磁场与其自转轴夹角达 47 度。与天王星不同的是，海王星的地热是其接收太阳辐射的 2.6 倍。

海王星大气高层主要由氢和氦组成，二者的比例分别大约是 89%和 19%，另外还含有甲烷等物质，甲烷被太阳紫外辐射光解后生成的有机气溶胶可以吸收太阳紫外辐射，形成逆

温层。在其大气低层（对流层，0.1 – 50 个大气压），有不同成分的云层。与天王星类似，这些云层自上而下分别为甲烷云、氨和硫化氢云和水云。海王星大气的“天气”现象更为活跃，海王星的大气风速高达 600 ms^{-1} ，基本是超音速的。当“旅行者 2 号”在 1989 年飞经海王星时，曾观测到巨大的反气旋风暴，也就是海王星的“大暗斑”（图 5.7.13），很像木星的大红斑”。但与“大红斑”数百年生命期不同的是，“大暗斑”只有几年的生命期。哈勃望远镜在 1994 年观测到“大暗斑”消失了，取而代之的是北半球生成了与“大暗斑”类似的巨大风暴。

NASA 发射“旅行者 2 号”是至今为止唯一访问过海王星的人造飞行器，它于 1989 年 8 月 25 日接近海王星。该飞船确定了海王星具有磁场以及其磁场偏离行星的中心，并发现了 6 颗新的卫星，很重要的是“旅行者 2 号”揭示了海王星具有极为活跃的“天气”现象。

5.6.9 总结

在本节，我们简要介绍了太阳系 7 大行星的物理、化学和动力学等基本性质、目前的研究进展和存在的挑战性问题。更全面和深入的介绍超出了本文的篇幅。通过这些简介，我们可以看出，太阳系行星的研究是一个天文学与地球科学相交叉的学科。与地球的比较是太阳系行星研究的一个主要特色，通过比较地球与其它固态星球（主要是金星和火星）的气候环境和内部结构的演变历史，我们一方面可以根据对地球的认识来理解金星和火星的演变，另一方面，这些比较也加深了我们对地球演化的认识。虽然气态星球与地球有着本质的不同，但气态星球大气运动的主要特征基本可以运用地球流体力学的基本原理进行解释，一些物理和化学特征也与地球大气类似。地球大气与气态星球大气之间的差别研究也能够增进我们对地球大气的理解。

太阳系行星为研究太阳系外行星提供了一个很好的参照系。近几年，随着越来越多的太阳系外行星的发现，系外行星研究已成为天文学领域的一个热点，但由于目前技术水平的限制，我们还无法很准确地探测这些系外行星物理和化学性质。一方面，关于太阳系行星的知识是认识这些系外行星的基础；另一方面，愈来愈多系外行星的发现促使我们认识到行星性质的多样性，这将加深我们对太阳系行星的认识，也将许多方面改变我们原有的关于太阳系行星的观念。关于太阳系外行星的知识将在下一节介绍。

参考文献:

- Bagenal, F., Dowling, T. E., & McKinnon, W. B. 2007, *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, Cambridge University Press.
- Bougher, S. W., Hunten, D. M., & Phillips, R. J. 1997, *Venus II Geology, Geophysics, Atmosphere, and Solar Wind Environment*, the University of Arizona Press.
- Bullock, M. A., & Grinspoon, D. H. 1999, Global climate change on Venus. *Scientific American*, 3, 50.
- Busse, F. H. 1976, Simple model of convection in Jovian atmosphere. *Icarus*, 29, 255.
- Cruikshank, D. P. 1995, *Neptune and Triton*, the University of Arizona Press.
- Gehrels, T., & Matthews, M. S. 1984, *Saturn*, the University of Arizona Press.
- Holmer, R., & Bloxham, J. 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 2177.
- Ingersoll, A. 1969, *J. Atmos. Sci.*, 26, 1191.
- Ingersoll, A.P. 1990, *Science* 248, 308.
- Ingersoll, A. P., Dowling, T. E., Gierasch, P. J., et al. 2004, Dynamics of Jupiter's atmosphere, in *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, Bagenal, F., Dowling, T. E., & McKinnon, W. B., Eds., Cambridge University Press, 105.
- Leovy, C. 2001, *Nature*, 412, 245-249.
- Littmann, M, & Standish, E. M. 2004, *Planets Beyond: Discovering the Outer Solar System*. Courier Dover Publications.
- Lodders, K., & Fegley Jr., B. 1998, *The Planetary Scientist's Companion*. Oxford University Press.
- Marcus, P. S. 1993, *Annu. Rev. Astron. Astronophys.*, 31, 523.
- Matthews, M. S., Bergstralh, J. T., & Miner, E. D. 1991, *Uranus*, the University of Arizona Press.
- Matthews, M. S., Kieffer, H. H., Jakosky, B. M., et al. 1992, *Mars*, the University of Arizona Press.
- Matthews, M. S., Vilas, F., & Chapman, C. R. 1989, *Mercury*, the University of Arizona Press.
- McKay, D. S., Gibson Jr., E. K., Thomas-Keprta, K. L., et al. 1996, *Science*, 273, 924–930.
- Nellis, W. J., Weir, S. T., & Mitchell, A. C. 1996, *Science*, 273, 936–938.
- de Pater, I., & Lissauer, J. J. 2010, *Planetary Sciences*. Cambridge University Press.

- Pierrehumbert, R. T. 2010, *Principles of Planetary Climate*, Cambridge University Press, New York.
- Raymond, S. N., Quinn, T., & Lunine, J. I. 2006, *Icarus*, 183, 265.
- Rhines, P. B. 1975, *J. Fluid. Mech.*, 69, 417.
- Taylor, F. W. 2010, *Planetary Atmospheres*. Oxford University Press, New York.
- Tian, F., Kasting, J. F., & Solomon, S. C. 2009, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02205, doi:10.1029/2008GL036513.
- Wetherill, G. W. 1980, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 18 (1), 77.
- 胡中为、徐伟彪，2008，*行星科学*，科学出版社.

表 5. 6. 1 太阳系行星的物理参数

行星	半径 (10^6 m)	质量	自转周期 (天)	公转周期 (年)	主要大气成分	P_s (bar)	T_s (K)
水星	2.42	0.06	58.64	0.241		10^{-15}	440
金星	6.05	0.82	-243.02	0.615	CO ₂ (96%), N ₂ (3%)	90	730
地球	6.37	1.0	1.0	1.00	N ₂ (77%), O ₂ (21%)	1	288
火星	3.40	0.11	1.03	1.88	CO ₂ (95%), N ₂ (3%)	0.007	218
木星	71.4	317.8	0.41	11.86	H ₂ (90%), He (10%)		
土星	60.0	95.2	0.43	29.5	H ₂ (97%), He (3%)		
天王星	26.15	14.6	-0.72	84.0	H ₂ (83%), He (15%), CH ₄ (2%)		
海王星	24.75	17.2	0.67	165	H ₂ (83%), He (15%), CH ₄ (2%)		

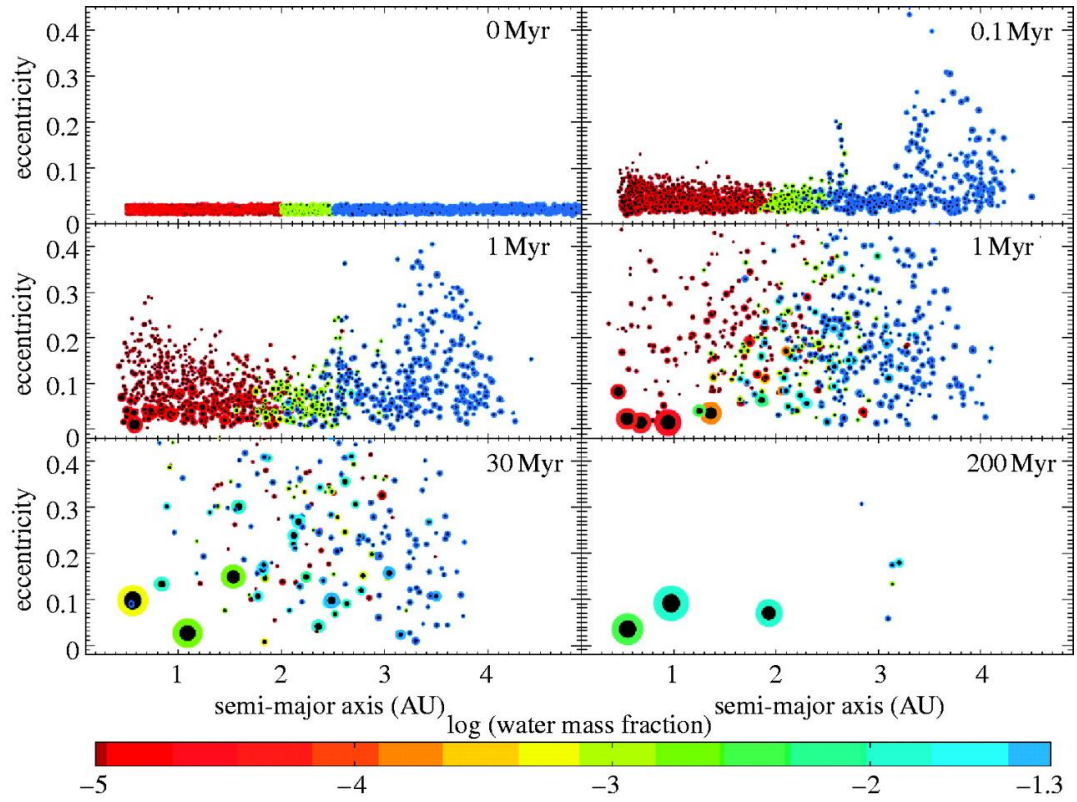


图 5.6.1 数值模式模拟的太阳系固态星球的形成过程。初始粒子数：1885 个，行星的直径与横坐标并不一致，彩色标尺代表行星的含水量，行星中心的黑色圆点代表了行星铁核的大小。除了太阳引力场，在 5 AU 的地方还有木星的存在（图中没有给出）。摘自 Raymond et al. (2006).



图 5.6.2 前苏联发射的“金星 13 号”着陆器拍摄的金星地表岩石和颗粒状土壤。

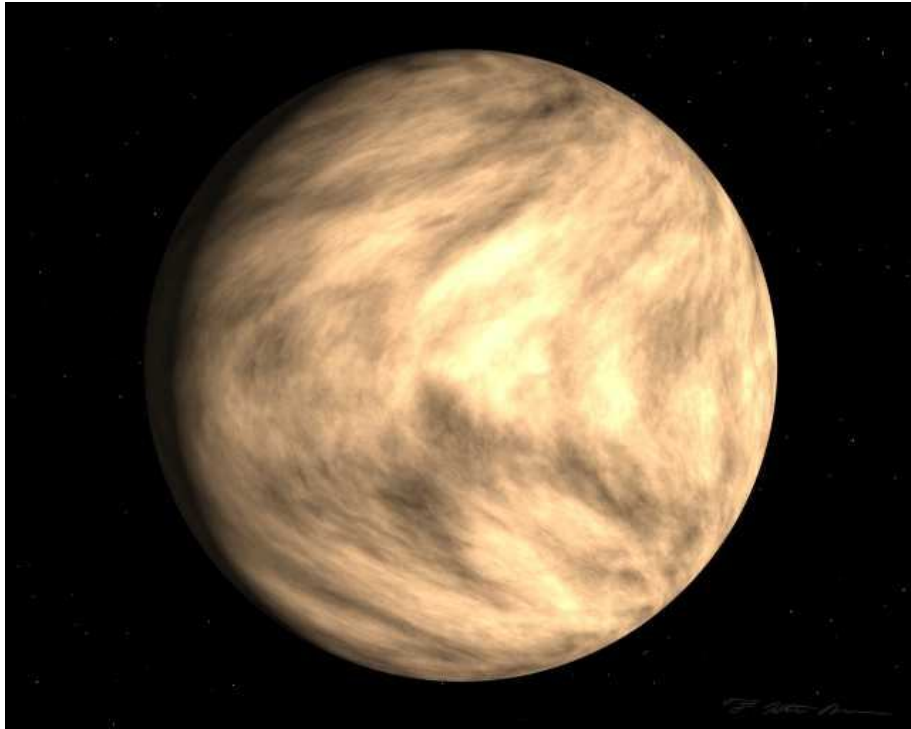


图 5.6.3 “水手 10 号”拍摄的金星图片。混浊的大气、浓密的云层以及自赤道到极地的气流结构都可以看到。

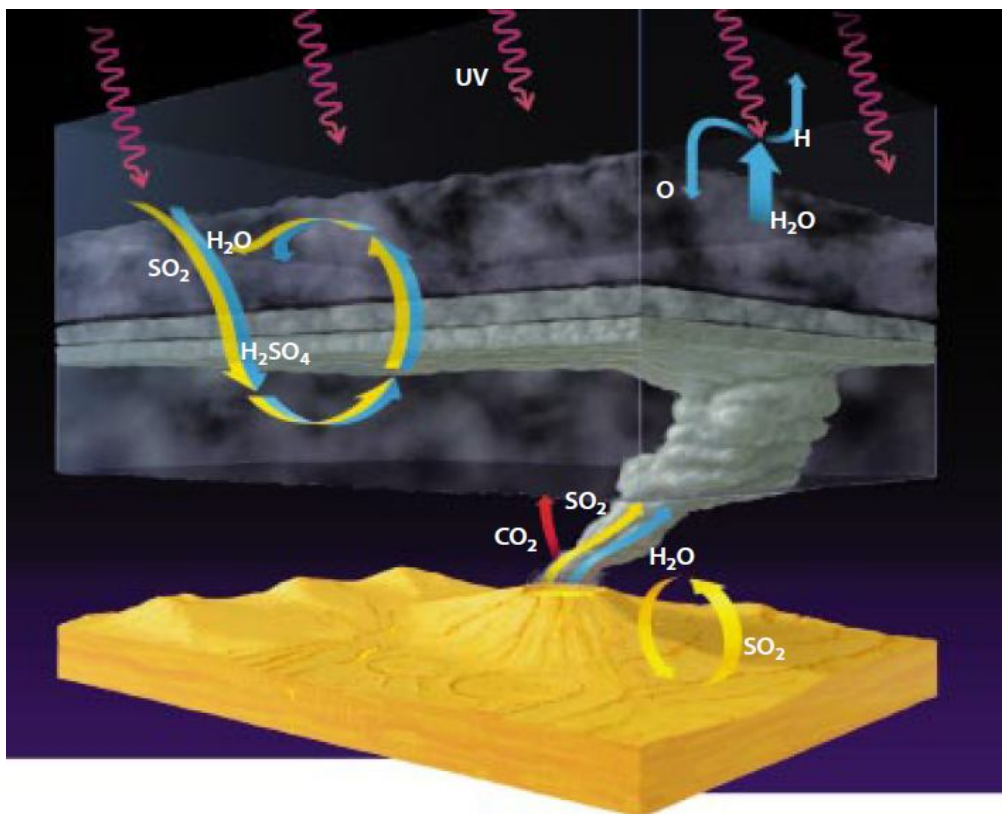


图 5.6.4 金星大气的不可逆物理和化学过程示意图 (Bullock and Grinspoon, 1999)。



图 5.6.5 哈勃望远镜拍摄的火星照片。两极的白色为 CO_2 干冰和水冰盖。火星表面呈红褐色是由于其土壤中含有大量的三氧化二铁。

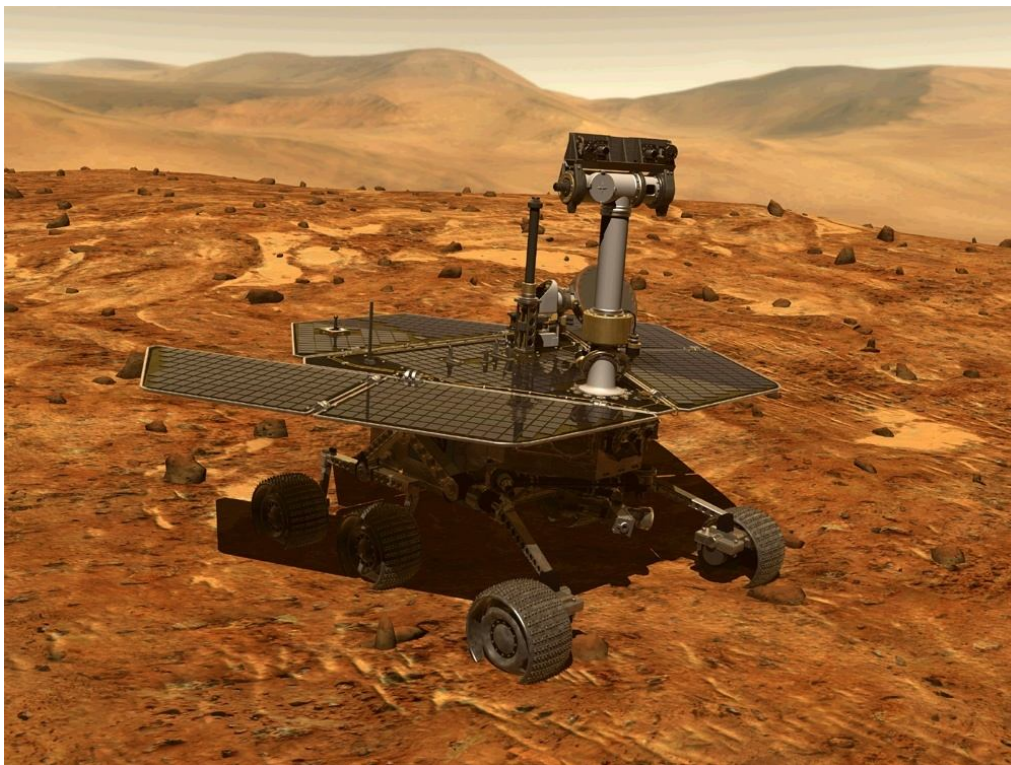


图 5.6.6 “勇气号”和“机会号”火星车外观（来自 NASA 公布的图片）。



图 5.6.7 “勇气号”火星车于 2006 年 10 月 26 日拍摄的火星地表照片。从照片中可以看到火星表面的沙砾和岩石。“勇气号”车轮压过的痕迹也清晰可见。

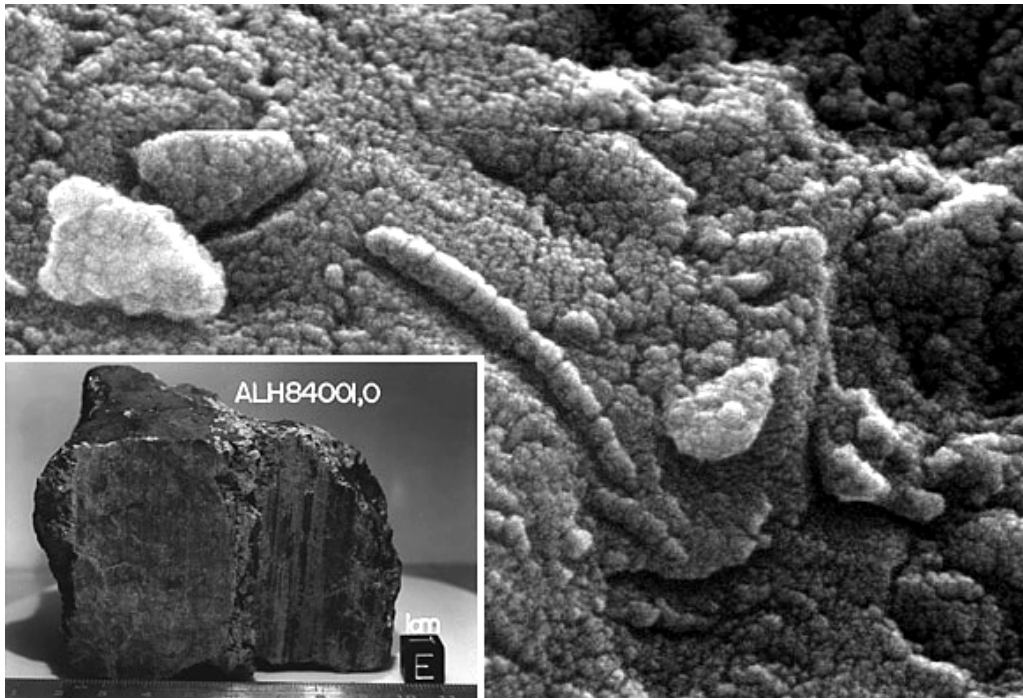


图 5.6.8 1984 年 12 月 27 日在南极发现的被认为是来自火星的陨石（编号：ALH84001）。图中显示的是在电子显微镜下看到的类似菌类微生物化石的特征。左下角的图给出了整个陨石的形状（摘自 McKay 等（1996））。

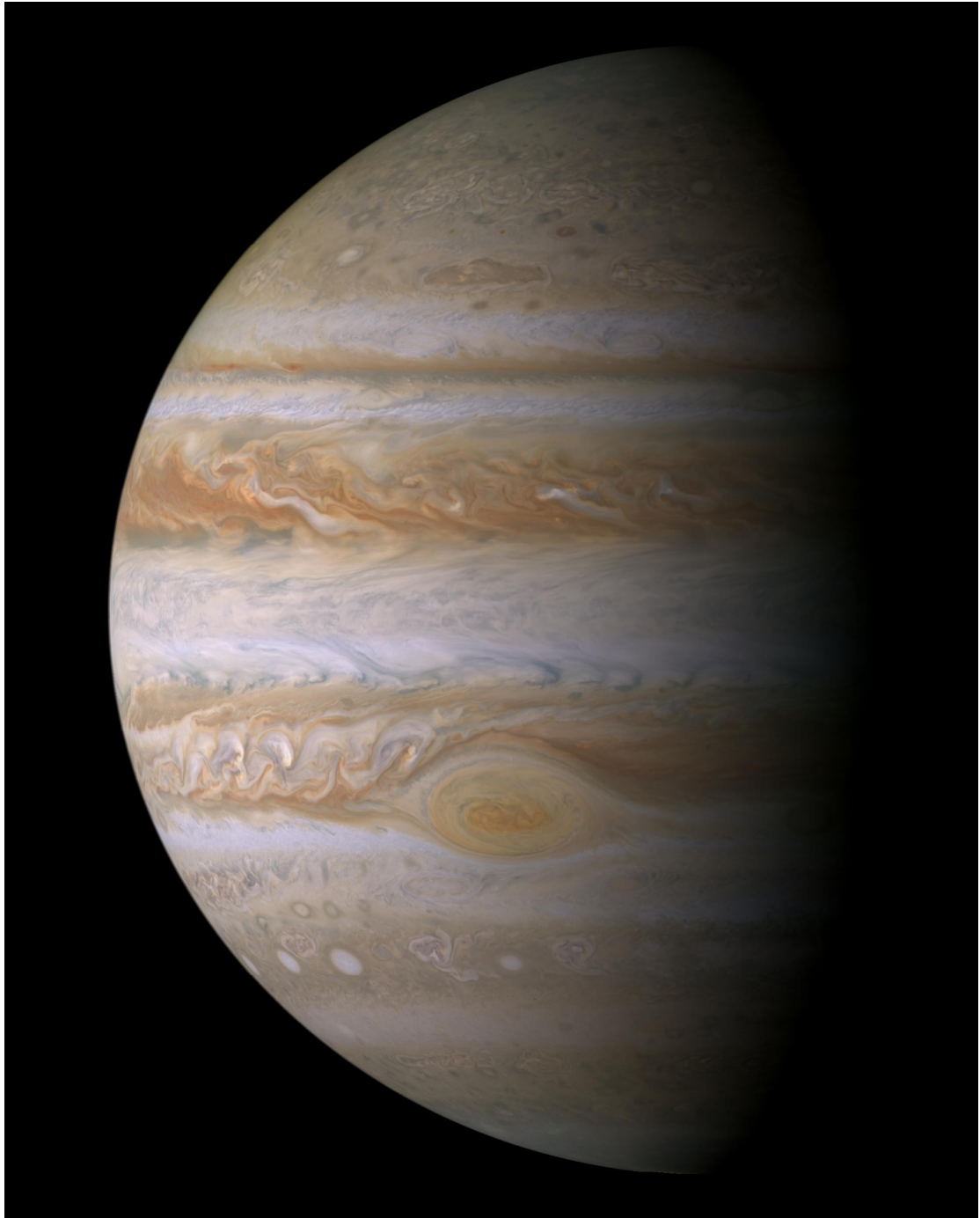


图 5.6.9 “卡西尼”宇宙飞船拍摄的木星图片（来自 NASA 公布的图片）。



图 5.6.10 “卡西尼号”宇宙飞船拍摄的土星图片（来自 NASA 公布的图片）。

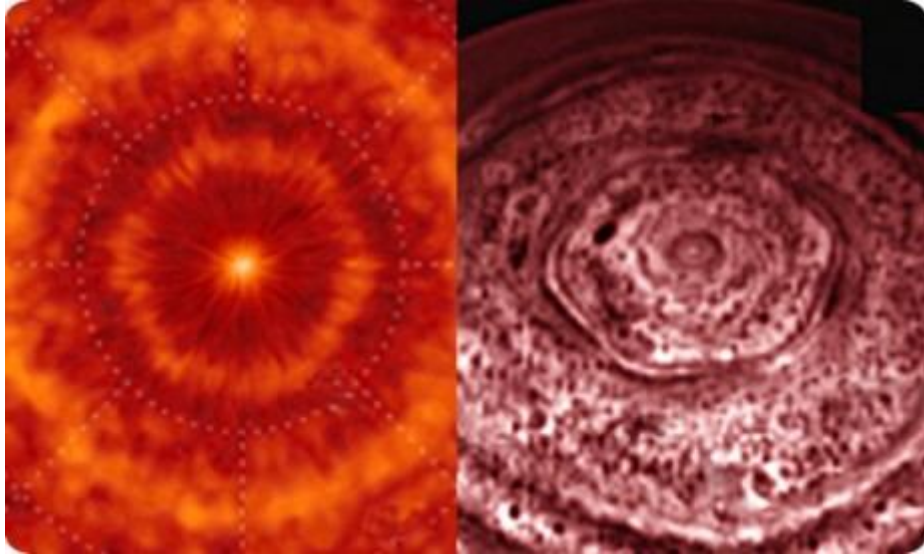


图 5.6.11 “卡西尼号”宇宙飞船拍摄的土星南极具有热中心的涡旋和北极正六边形涡旋。该照片的拍摄使用的是红外波段（来自 NASA 公布的图片）。



图 5.6.12 “惠更斯号”探测器在土卫六表面着陆后拍摄的照片（来自 NASA 公布的图片）。

混浊的大气中充满了有机气溶胶。

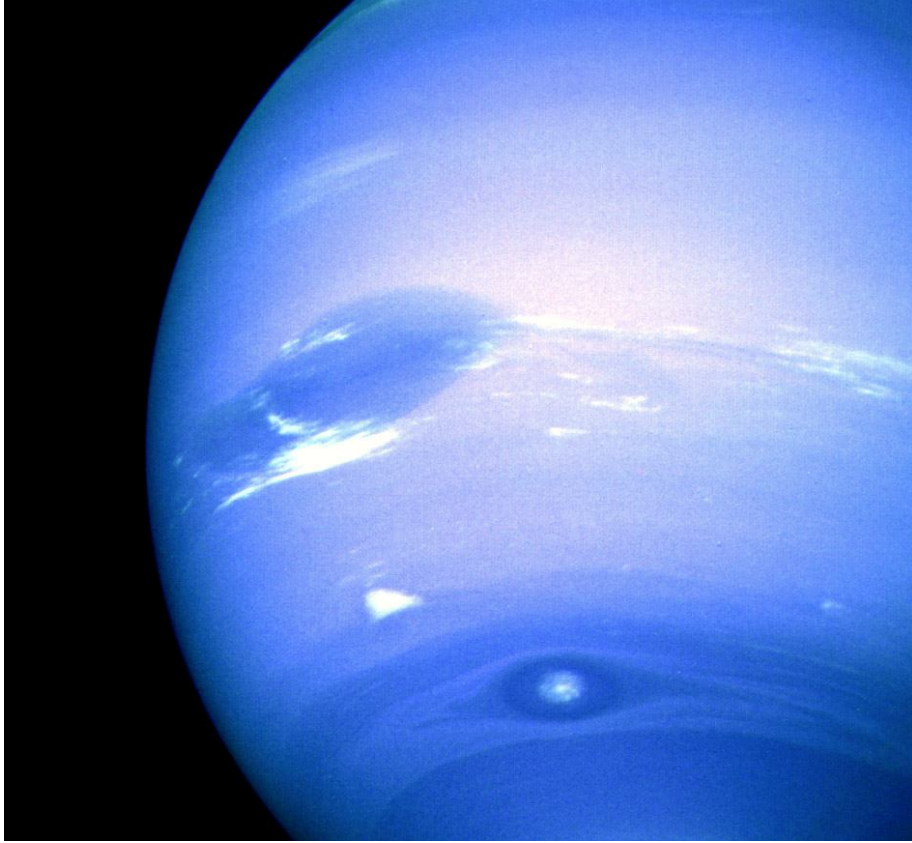


图 5.6.13 “旅行者 2 号”拍摄的海王星照片（来自 NASA 公布的图片）。可以看到大暗斑、靠近南极的涡旋和白色的云系。