

环绕恒星的原行星盘: 行星的“诞生摇篮”

季江徽

中国科学院行星科学重点实验室, 紫金山天文台, 南京 210008

E-mail: jijh@pmo.ac.cn

2014年9月, 智利北部阿塔卡马沙漠高原上新建成的阿塔卡马毫米/亚毫米波阵列(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA)进行了仪器测试, 开展了持续的天文观测项目。ALMA是用干涉方法进行天文观测的射电天线阵, 由66个天线构成, 总长度达到16 km。ALMA是一个国际合作建设的天文工程, 由来自欧洲、北美和东亚等的各国(地区)合作运行。天文学家利用ALMA拍摄了HL Tauri周围的气体和尘埃盘的观测图像(图1)^[1]。当ALMA的超级计算机将这些射电望远镜阵列接收到的光子拼接在一起时, 发现HL Tauri附近的尘埃分布呈现一系列的清晰环状结构。这些环状结构让天文学家感到欣喜, 因为这像极了行星形成理论所预言的场景——刚刚诞生的行星可以在围绕在中心恒星周围的原行星盘中蚀刻产生间隙(图1)。因而, ALMA揭开了原行星盘的射电观测新纪元。

根据行星形成理论, 当行星生长到一定质量, 它将在围绕于恒星周围的原行星盘中打开一个环状间隙。由于原行星盘的结构与盘内行星的生长过程密切相关, ALMA捕获的原行星盘的环状结构给行星科学领域带来了一场革命。在此后的4年里, 天文学家陆续拍摄了许多其他年轻恒星周围的气体和尘埃盘的观测图像(图2)^[2]。这些代表着行星形成区域的图像呈现出了各种各样的图案: 有些是整齐的椭圆盘中夹着清晰的环状空带, 有些则像微型的星系那样由旋臂组成开放的弧形^[3,4]。

这些丰富的行星形成区图像有助于探索太阳系和其他系外行星系统的形成机制。早期的理论如星云假说(Nebular hypothesis), 无疑是最为广泛接受的解释太阳系形成与演化的模型。该理论可追溯到德国哲学家康德和法国数学家拉普拉斯, 认为太阳和行星诞生于一团模糊的气体和尘埃云。这个假说可较好地阐明太阳系行星轨道接近圆形和共面性及其运动方向与太阳自转方向的一致性。康德和拉普拉斯的星云假说虽然有一些局限性, 譬如无法解释星云中角动量的传输问题, 但无疑是现代行星形成理论的雏形。现今的天文学家一直致力于改进和完善行星形成理论的诸多细节问题。目前广泛接受的行星形成模型认为, 分子云坍塌导致形成恒星, 气体和尘埃则会在围绕年轻恒星的原行星盘内残留、冷却, 尘埃会逐渐凝结成更大的颗粒, 然后长大生成类似于太阳系小行星大小的物体, 称为



季江徽 中国科学院紫金山天文台研究员, 中国科学技术大学博士生导师, 中国科学院紫金山天文台行星科学与深空探测实验室主任, 中国科学院行星科学重点实验室主任, 中国天文学会行星专业委员会主任, 中国天文学会第十四届理事, 国家深空探测重大项目实施方案论证报告编写组成员, 中国科学院空间科学战略研究专家组成员, 中国天文学会和国际天文联合会会员, 亚太地球科学学会会员。长期从事太阳系小天体动力学、系外行星系统形成与动力演化、深空探测轨道与技术等研究。研究成果多次获得年度十大天文进展, 入选《国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)》。2016年获王宽诚行星科学成果奖, 2017年入选中国科学院创新交叉团队。

星子(planetesimal), 进而星子之间发生大规模的相互碰撞而形成更大尺寸的行星胚胎。这些岩石抑或吸积大量气体, 形成类似木星的气体巨行星, 抑或直接成为类似于地球的岩石类行星。

行星形成理论的一个关键环节是, 像木星一样的气态巨行星必须在原行星盘气体消散前形成, 因为只有在原行星盘尚且存在的时候, 行星方能吸积其中的氢氦气体。这种流行的行星形成理论通常被称为核吸积模型(core-accretion scenario)。它认为由固体物质组成的数千千米大小的星子首先形成, 之后星子通过引力作用发生碰撞并合而不断生长。如果在原行星盘仍存在的时候能够长成十多个地球质量($1 \text{ 地球质量} = 5.965 \times 10^{24} \text{ kg}$)的行星核, 则可以触发快速吸积气体的过程, 迅速长成木星或土星这样的气态巨行星。如果行星核无法在原行星盘存在时达到快速吸积气体的临界质量, 则其最终演变成地球和火星这样的类地行星。基于对原行星盘和年轻恒星年龄的天文统计观测, 天文学家发现原行星盘的寿命大约为100万~1000万年。这表明行星核的形成过程非常迅速, 在1000万年内, 完成从分子云内的尘埃长到十多个地球质量的行星核, 再生长到气态

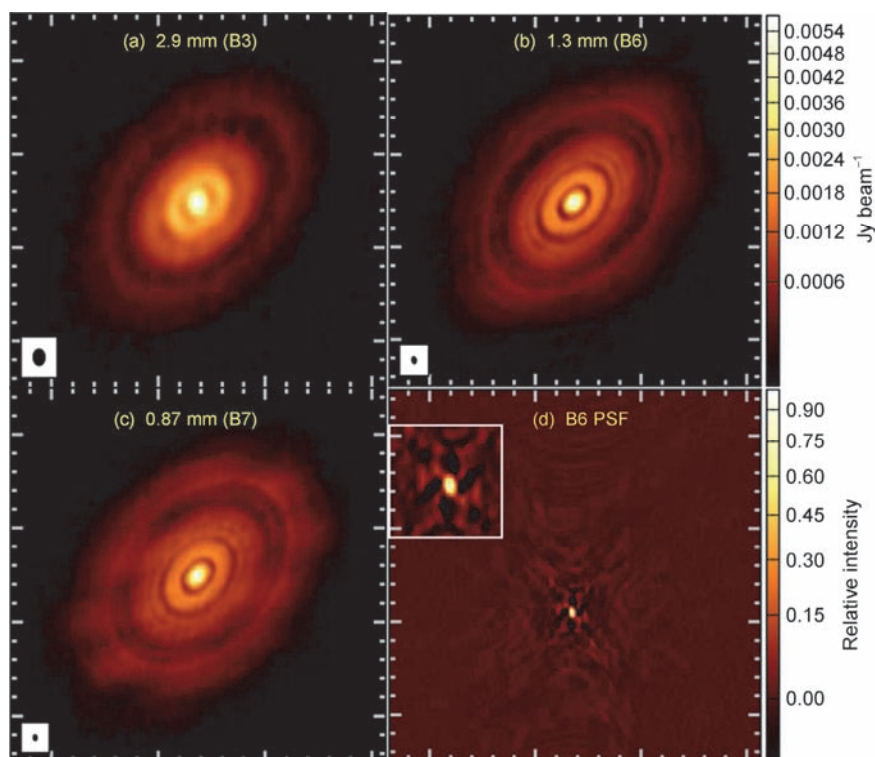


图1 (网络版彩色)ALMA 观测 HL Tauri 的 Band 6 和 7 的尘埃连续谱图像^[1]

Figure 1 (Color online) Observed dust continuum images at Band 6 and 7 of HL Tauri by ALMA^[1]

巨行星这样的完整过程. 另一方面, 随着越来越多的系外行星被发现, 这些行星具有不同的轨道和物理参数, 呈现出多样性和复杂性. 有些系外行星与太阳系行星差别巨大, 比如围绕中心恒星的公转周期只有几天的气态巨行星和海王星质量行星, 它们被天文学家形象地称为“热木星”和“热海王星”. 这些多样的系外行星在原行星盘中如何形成? 这对目前的行星形成理论提出了新挑战.

为了阐明上述行星形成理论的难点, 天文学家提出了许多物理机制. 在解释尘埃如何快速聚集生长成行星核这个问题上, 天文学家提出了流动不稳定性(streaming instability)和卵石吸积(pebble accretion)理论. 流动不稳定性针对的是从尘埃变成千米级团块的过程. 原行星盘的气体盘做着围绕中央恒星的流体运动. 在这个过程中, 气体盘和盘中的尘埃迅速冷却, 尘埃在气体盘内快速漂移, 并在自引力的作用下聚集并坍塌, 从厘米级灰尘或冰长成 1~100 km 的高密度聚集体, 成为构建行星核的基础^[5]. 卵石吸积理论试图解释气态巨行星内部十多个地球质量的行星核的形成过程. 根据该理论, 原行星盘中有大量在恒星形成时期生成的尘埃和卵石. 原行星盘中的星子形成后, 与气体盘的角动量交换将使其发生轨道迁移, 逐渐接近中央恒星或者远离中央恒星. 在星子的轨道迁移过程中, 它将通过引力吸积盘中的尘埃和卵石, 像滚雪球一样迅速变大, 长成构建气态巨行星的内核^[6]. 太阳系的木星和土星有可能在

早期经历了卵石吸积过程. 原行星盘内的星子和行星胚胎与气体盘的相互作用也是行星形成理论中的重要一环. 一方面, 星子和行星胚胎在气体盘内受到林德巴纳德力矩(Lindblad torque)和共旋力矩(corotation torque)的影响, 与气体盘交换角动量, 发生接近或远离中央恒星的轨道迁移^[7,8]. 另一方面, 对于质量足够大的行星, 它的希尔半径可以超过气体盘的厚度; 相对于行星的引力势而言, 气体盘很薄, 此时行星可以在气体盘内打开一个空带, 行星和它在盘内打开的空带一起迁移^[9]. 再回到图 2 观测到的各个原行星盘的环状结构, 它和气态巨行星在气体盘中打开的空带很像^[2,10]. 这表明, 如果这些系统中的环状结构确实是由年轻的行星产生的, 那么说明行星的生长速度确实非常快, 类似于木星大小的气态行星则可在 10 万年的时标内生成.

原行星盘的观测已成为现今行星科学研究的一个热点. 可是随着观测样本的扩大, 又有新的挑战出现在人们面前. 针对原行星盘质量的观测统计表明, 原行星盘的质量远低于其孕育行星系统所需要的质量, 有时甚至只有典型系外行星系统总质量的 1%, 且原行星盘的低质量在银河系中是一个普遍存在的现象^[11,12]. 天文学家提出了一些可能的解释, 比如组成原行星盘中的材料可能是望远镜难以全部捕获的, 实际的原行星盘质量或许比我们看到的还要大; 比如恒星和原行星盘系统可能一直在从原行星盘外

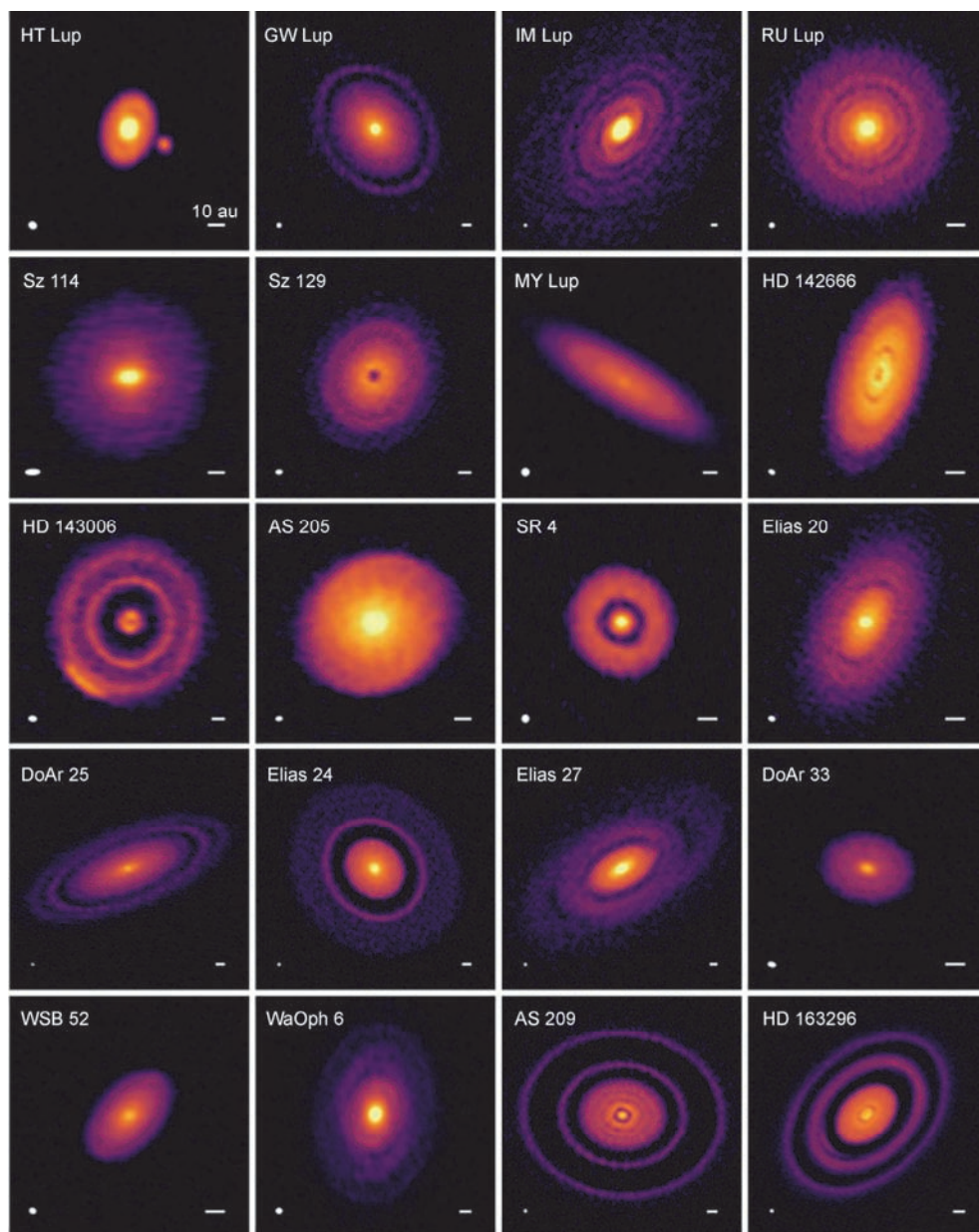


图 2 (网络版彩色)DSHARP(Disk Substructures at High Angular Resolution Project)观测到的 20 个原行星盘的 240 GHz 尘埃连续谱^[2]

Figure 2 (Color online) Observed dust continuum at 240 GHz of 20 protoplanetary disks by DSHARP(Disk Substructures at High Angular Resolution Project)^[2]

部积聚新材料,不断把创造它们的分子云中的物质吸积到盘中. 在 2017 年的一项研究中,天体物理学家发现了两条与 HL Tauri 盘相连的气流^[13]. 虽然无法判断外部的气体是流向还是远离 HL Tauri 恒星,但这足以表明恒星和行星在形成和生长过程中与外部的宇宙空间保持联系,因此不能把恒星和行星形成简单地看作孤立系统.

随着天文学家不断获得高分辨率原行星盘图像,越来越多的证据支持“行星在恒星生命的早期就已形成”的观点. 这些高分辨率的图像一部分来自上述的 ALMA 望远镜,还

有一些来自欧洲南方天文台(European Southern Observatory, ESO)甚大望远镜上的 SPHERE 仪器. ESO 的超大望远镜也位于阿塔卡马沙漠,距离 ALMA 南部约 6 h 车程. 值得指出的是, SPHERE 仪器安装了消除大气抖动的自适应光学系统. 截至目前,天文学家利用该仪器捕捉到了 8 个年轻的类太阳恒星周围的原行星盘^[2]. 这些原行星盘中,有些是规整的椭圆盘中夹着清晰的环形空带,有些则像微型的星系那样由弧形旋臂构成. 观测到的原行星盘的多样性表明,行星形成过程极其复杂,足以产生多种可能

的结果.

虽然观测到的各种原行星盘结构成因可基于行星和盘的相互作用来解释,但是天文学家依然不能确定行星是否是产生这些结构的唯一可能.一方面,原行星盘中的不稳定性也可以在原行星盘中产生多种多样的复杂结构.另一方面,行星形成理论远比260多年前康德所预测的要复杂,而且细节更为丰富.天文学家意识到深入理解原行星盘和行星的形成与演化过程仍然需要大量的理论研究工作.最近的理论工作表明,原行星盘本身的流体不稳定性亦可以产生大尺度的结构特征^[14].另外,原行星盘本身的物理性质,比如黏滞度和磁场性质等,也对其呈现出的结构有决定性的影响^[15].

更多的原行星盘观测结果可以帮助行星形成理论快速发展.除了ALMA和SPHERE之外,位于智利安地斯山的Gemini Planet Imager(GPI)也加入到观测原行星盘的阵营.在不久的将来,等到具有更高分辨率的射电干涉阵落成后,这个观测队伍会进一步壮大.建设中的射电干涉阵包括英国的梅林(Merlin)阵列望远镜,位于南非和澳大利

亚西部的Square Kilometer Array(SKA),以及美国正在预研的下一代甚大天线阵(Next Generation Very Large Array, ngVLA).这些射电阵列将填补目前的一些观测空白,比如它们可以观测到厘米波段的信息,从而得到原行星盘中厘米级物质颗粒的分布图像.这样的厘米波图像有助于天文学家深入理解从尘埃生长到星子的中间过程.ngVLA的分辨率可以达到0.7个天文单位,它将有能力探测星子区域的物理环境,还可以分辨年轻行星在原行星盘形成的密度扰动.

综上,针对原行星盘的研究方兴未艾,未来更高分辨率的观测研究将更清晰地揭示原行星盘的特征.在行星形成研究方面,虽然天文学家基于已有的观测样本发展了有关理论,但由于牵涉到原行星盘复杂的物理和化学过程,仍然有许多细节需要不断完善.可以预期,伴随着未来空间和地基观测项目的开展,将会获得更加丰富的观测数据,原行星盘和行星形成的研究必将迈入一个蓬勃发展的新阶段.这些研究不仅有助于揭开一般行星系统形成演化的“谜团”,亦为太阳系自身的起源演化提供重要科学线索.

致谢 感谢国家自然科学基金(11773081, 11661161013)、中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15020302)、中国科学院创新交叉团队项目和紫金山天文台小行星基金会资助.

推荐阅读文献

- 1 ALMA Partnership. The 2014 ALMA long baseline campaign: First results from high angular resolution observations toward the HL Tau region. *Astrophys J Lett*, 2015, 808: L3
- 2 Andrews S M, Huang J, Perez L M, et al. The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). I. Motivation, sample, calibration, and overview. *Astrophys J Lett*, 2018, 869: L41
- 3 Avenhaus H, Quanz S P, Garufi A, et al. Disks ARound T Tauri Stars with SPHERE (DARTTS-S). I. SPHERE/IRDIS polarimetric imaging of eight prominent T Tauri disks. *Astrophys J*, 2018, 863: 44
- 4 Keppler M, Benisty M, Muller A, et al. Discovery of a planetary-mass companion within the gap of the transition disk around PDS 70. *Astron Astrophys*, 2018, 617: A44
- 5 Johansen A, Youdin A. Protoplanetary disk turbulence driven by the streaming instability: Nonlinear saturation and particle concentration. *Astrophys J*, 2007, 662: 627
- 6 Lambrechts M, Johansen A. Rapid growth of gas-giant cores by pebble accretion. *Astron Astrophys*, 2012, 544: A32
- 7 Korycansky D G, Pollack J B. Numerical-calculations of the linear response of a gaseous disk to a protoplanet. *Icarus*, 1993, 102: 150–165
- 8 Tanaka H, Takeuchi T, Ward W R. Three-dimensional interaction between a planet and an isothermal gaseous disk. I. Corotation and Lindblad torques and planet migration. *Astrophys J*, 2002, 565: 1257–1274
- 9 Lin D N C, Papaloizou J. On the tidal interaction between protoplanets and the protoplanetary disk. 3. Orbital migration of protoplanets. *Astrophys J*, 1986, 309: 846–857
- 10 Jin S, Li S T, Isella A, et al. Modeling dust emission of HL Tau disk based on planet-disk interactions. *Astrophys J*, 2016, 818: 76
- 11 Mohanty S, Greaves J, Mortlock D, et al. Protoplanetary disk masses from stars to brown dwarfs. *Astrophys J*, 2013, 773: 168
- 12 Manara C F, Morbidelli A, Guillot T. Why do protoplanetary disks appear not massive enough to form the known exoplanet population? *Astron Astrophys*, 2018, 618: L3
- 13 Yen H W, Takakuwa S, Chu Y H, et al. 1000 au exterior arcs connected to the protoplanetary disk around HL Tauri. *Astron Astrophys*, 2017, 608: A134
- 14 Huang P H, Isella A, Li H, et al. Identifying anticyclonic vortex features produced by the Rossby wave instability in protoplanetary disks. *Astrophys J*, 2018, 867: 3
- 15 Dong R B, Li S T, Chiang E, et al. Multiple disk gaps and rings generated by a single super-Earth. II. Spacings, depths, and number of gaps, with application to real systems. *Astrophys J*, 2018, 866: 110

Summary for “环绕恒星的原行星盘：行星的‘诞生摇篮’”

Protoplanetary disks surrounding the stars: The birth cradle of planets

Jianghui Ji

CAS Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
E-mail: jijh@pmo.ac.cn

The classical theory of planet formation can be traced back to the German philosopher Kant, who speculated that the Sun and the major planets were created in a cloud of faint gas and dust that gradually collapsed and flattened. In the theory, the planets are predicted to move about the Sun in low eccentric orbits and they are nearly coplanar. Nowadays, astronomers have developed this theory to further improve our understanding of planet formation process based on modern astronomical observations and high-speed computations. The widely accepted model of planet formation suggests that molecular clouds collapse to form the protostars in the central region, while the gas and dust remain in the protoplanetary disk surrounding young stars. In the subsequent process, the gas and dust in the protoplanetary disk can be further cooled down and gradually condensed into larger particles, then grow into planetesimals; the planetesimals can form planetary embryos through mutual gravitational interaction and frequent collisions, finally produce terrestrial planets and gas-giants. In this so-called core-accretion scenario, there exists a key issue to be first solved—the gas-giants such as Jupiter should be formed right before the protoplanetary disk entirely dissipates, because these gaseous planets, which initially start from a terrestrial core of a mass up to ten Earth masses, can only accumulate hydrogen and helium when the protoplanetary disk is still present. Based on observations of the protoplanetary disks and the age of young stars, the astronomers have shown that the lifetime of protoplanetary disks is roughly estimated to be 1–10 million years. This indicates that the formation process of gas-giants needs to be supremely fast. The entire formation scenario from the gas and dust in the molecular cloud to more than a dozen Earth mass planetary cores and then to the gas-giants should be completed in approximately 10 million years. In 2014, the ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) imaged the first protoplanetary disk around the HL Tauri system with high-resolution, which shows a surprising outcome of a series of concentric bright rings separated by gaps in this system. Such kind of structure was simply previously predicted by the theory or direct numerical simulations. According to the planet formation, when a planet grows up to a certain mass, it will open an annular gap in the protoplanetary disk around the star. Since the observed structure of the HL Tauri disk is probably related to a potential planetary system in the disk, this indicates that the planets scratch the disk. Such high-resolution images have brought a deep understanding of protoplanetary disk and planet formation. In the last few years, more and more gas and dust disks have been observed surrounding other young stars by ALMA and other ground-based projects. These observations do provide us the morphology of planet-forming regions, thereby showing a variety of patterns of spiral structure and ring structure, etc. The rich images of planet-forming regions can help us have a better understanding of the formation of our own solar system planets and other systems beyond us.

planet formation, the protoplanetary disk, gas-giants, ALMA

doi: 10.1360/TB-2019-0007