

How do planets form?

行星形成

叶永烜

中央大学天文所, 桃园 32001

E-mail: wingip@astro.ncu.edu.tw

2016-01-25 收稿, 2016-01-25 修回, 2016-01-25 接受, 2016-04-25 网络版发表

摘要 在过去几年, 由于深空探测特别是几个彗星任务的科学结果、以及理论模拟的突破, 使我们对行星形成的过程有新的想法. 其中包括微星体和行星胚胎的产生可能部分以小圆石块积生而成, 而“星尘号”和“罗塞塔”彗星计划告诉我们一方面太阳星云的固态尘埃粒子曾经大规模的混合, 另一方面挥发性冰晶物质含有很大的星际物质成分. 彗星67P含有丰度仅次于水分子中的氧分子亦是一个完全未预期到的结果. 再加上系外行星的发现和第9行星的搜寻, 太阳系来源的研究将进入一个新境界.

关键词 太阳星云, 圆石块吸积作用, 彗星探测, 系外行星, 第九行星

自从第一个系外行星在1995年被发现后, 至今已经有逾2000个系外行星, 逾500个含两个或以上行星的行星系统登录在www.exoplanet.eu. 我们的预期是这些系外行星系统的存在, 会有助于我们了解太阳系的来源. 但实际情况是每个行星系统的形成, 可能都有它的特殊因素, 没有一个简单的通则. 譬如说行星系统的主星是否在一个星团中产生, 以及在星团的哪个位置, 都会对各行星的轨道结构有很大的影响. 最近有关第九行星存在的研究报告^[1], 便是与太阳和很多恒星在一个星团中同时形成有关. 如果这个星团的恒星数目多逾数百, 则大质量的OB恒星率先出现, 并快速演化到末期以超新星爆炸为止的机率便很大. 说不定产生太阳星云的低质量分子云便是因超新星爆炸的震波压力而塌缩的^[2].

此外根据陨石研究结果, 太阳星云的附近曾有一个超新星爆炸, 把大量的放射性元素注入入太阳星云, 其中包括辐射衰变半衰期时间只有 7.3×10^5 年的 ^{26}Al ^[3]. 星云温度随着渐减使得气体开始凝结成固体粒子. 由于越靠近原始太阳中心温度越高, 只有金属和石质的物质可以凝固成为构成内行星的材料. 而水、二氧化碳、一氧化碳及其他挥发性高的气体只

有在离原始太阳远处的区域, 才可以凝固成冰粒. 水冰开始凝结的轨道距离约3天文单位处通称为雪线. 除了冰粒外, 分子云中的星际尘粒也可以完整保存在低温的外太阳系区域. 所以另一个重要假设便是如彗星的冰质微星体定会含有大量的有机星际尘粒^[4]. 这种星际物质和彗星的关系便有待太空彗星探测计划的证实. 但美国NASA的星尘(stardust)彗星尘埃标本采样计划发现短周期彗星81P/Wild 2(惠尔特2号)的厘米尘粒找不到星际物质, 反而是成分与在接近太阳区域形成的陨石相似, 另外也找到凝结温度在1000~2000 K的硅晶粒子^[5]. 这表示在行星形成过程中, 一定有大尺度运输或对流机制将内太阳系高温区域的物质输送到整个太阳星云. 这可能是磁场重联作用而产生的“X-风”效应^[6], 但也可能是大型湍流作用的效应^[7], 到今尚未有定论.

在行星的形成过程中, 也就是物体如何从厘米大小的细粒累积成几百公里到几千公里大的个体, 湍流也扮演着非常关键的角色. 简而言之, 初始的细粒聚集在太阳星云中间的平面形成固态尘粒高密度的碟状薄片, 彼此碰撞的速度非常小, 利用表面吸引力可以在短时间内便积生成公分到公尺大小的小圆

引用格式: 叶永烜. 行星形成. 科学通报, 2016, 61: 1758–1761

Ip W H. New insights to the planetary formation process (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1758–1761, doi: 10.1360/N972016-00118

石颗粒. 但从这个阶段跨进更大的尺寸范围便再不能依靠这个机制. 要解决这个瓶颈, 一个理论模型便是当太阳星云中间尘埃薄片产生密度扰动变化, 这些局部的高密度区域因重力不稳定性作用可以继续增生而形成一团, 由此产生数十公尺到数十公里的微星体^[8,9]. 这些微星体利用自身的微重力, 便可以因低速度的非弹性碰撞而结合成更大的原行星和矮行星了.

但以上的经典范例有着几个基础问题. 第一个是太阳星云中间的尘埃片绕着原始太阳旋转的速度, 和上下气层是有显著的差别. 这个相对速度可以产生湍流作用, 从而破坏了尘埃薄片的重力不稳定性效应^[10]. 第二个问题是纵使数十公尺到数公里大小的微星体开始产生, 它们和太阳星云气体的流体力学作用可以快速缩小轨道, 引致不能停留在原来的源区^[11]. 碰撞模型计算指出在外行星轨道范围, 要从数十公尺逐步建立致数百公里大小的物体大小分布需要数百万年的时间^[12], 这比起微星体的流体力学轨道迁移时间显然是长了很多. 如何能在这瞬息万变的太阳星云外围, 贮存足够的冰质微星体质量来制造原行星? 第三个难点则是在于天文观察告诉我们, 原始恒星的吸积盘的寿命通常只有数百万年^[13], 也就是说如果太阳星云的气体流失了, 含有大量氢和氦的类木行星的积生便会中途夭折. 这些考虑都给行星科学研究者带来很大的挑战.

在过去十年有一个新的提议可能把这些问题都一笔勾销. 有趣的是所谓解铃还在系铃人, 这个理论基础是在于太阳星云中间尘埃薄片和上下气层的气体力学作用产生的湍流结构. 利用高分解率的数值模拟计算发现在一定的条件下, 因为流不稳定性尘埃薄片的密度扰动可以产生漩涡般的构造^[14]. 重要的是在这些漩涡中的小圆石颗粒可以有着很大的密度. 如果把这些小圆石质量集合起来, 一个漩涡便足以产生一个数百公里大小的矮行星^[15]. 这种“小圆石积生”模型给太阳系来源理论带来很大的冲击. 因为一方面它解决了小圆石颗粒无法从下而上聚集成大型星体的问题, 也躲避了时间的限制. 这种用太阳星云流不稳定性效应从上而下产生的原行星族群的大小分布, 在某个程度亦符合小行星可能一开始便是以大于一百公里左右的大小为主, 经后来的碰撞分裂演化才形成今日的大小分布^[16]. 这些新发展都是倾覆了以前的标准模型, 但很值得我们注意.

彗星研究的主要出发点是它们代表行星形成的

积木块, 彗核的组成物质如 CO_2 , CO , NH_3 等都是冰质微星体形成时保存下来者. 但一个重要盲点却是根据行星积生模型和碰撞频率的计算, 我们今日看到的短周期彗星, 事实上绝大部分都是一百公里到几百公里的母体(亦即海王星外物体)经多次高速度碰撞分裂而成^[17]. 在这种情况下, 为何 CO_2 , CO 等冰晶不会因撞击加热而散失, 这是一个很难解释的问题. 反过来说, 这些原始冰晶的存在是否表示正如小圆石积生模型的建构, 整个太阳系形成的过程都要重新评估? 这些议题在欧洲太空局的罗塞塔彗星探测计划的初步成果公布后, 更加令人注目^[18].

罗塞塔计划带来另一个惊奇, 这便是宇宙飞船上的中性分子质谱仪发现彗星67P含有很大的 O_2 分子, 平均丰度比例是水的3.8%^[19]. 也可以说是除水之外, 含量第二高的便是 O_2 . 欧空局的乔图宇宙飞船中性分子质谱仪飞越哈雷彗星得到的数据的重新分析, 也证明哈雷彗星的 O_2 丰度也高达3.7%^[20]. 所以这个现象可以说是整个太阳星云的特性. 现在有两个说法: 一个是说 O_2 是因为 H_2O 的冰受到宇宙射线的长期照射而产生. 但因为这种辐射分解作用也会产生臭氧(O_3)^[21], 而罗塞塔的质谱仪实验并未看到, 所以这个提议不能成立. 另一个提议则是说形成太阳星云前的分子云温度(20~30 K)比较高于其他的分子云(~10 K), 所以容许 O_2 分子的多量产生^[19]. 当然这些想法是基于分子云的气体成分都不受太阳星云动力学影响, 而能直接保留在彗核冰晶中. 此外, 彗核或它们的母体内部化学成分经 ^{26}Al 辐射衰变加热会不会受到改变, 都是需要作进一步了解.

陨石和地球的整体成分所有的碳丰度比彗星、太阳和星际物质都少很多, 这可能是因为太阳星云内部的尘埃粒子所含的碳质成分受到高温氧原子的侵蚀所致^[22]. 这种机制和原太阳产生的巨量恒星风和X射线及紫外线造成的光致蒸发有关^[23]. 这种碳成分缺失的现象在其他的行星系统也找到迹象^[24], 所以可能是一种非常普遍的过程. 原始太阳磁场重联作用产生的X-风, 太阳星云流不稳定性衍生的小圆石积生机制, 以及早期的光致蒸发现象, 实际上都和电浆物理和磁流体力学分不开. 而控制超级地球大气环境变迁和生物圈演化更和恒星风作用直接有关^[25]. 这个前沿领域的开拓需要混合力学、电浆物理和辐射传导计算的大尺度数值模拟工作, 但更需要跨界和跨领域的思维.

参考文献

- 1 Batygin K, Brown M E. Evidence for a distant giant planet in the solar system. 2016, ArXiv:1601.05438v1
- 2 Boss A P, Keiser S A. Triggering collapse of the presolar dense cloud core and injecting short-lived radio-isotopes with a shock wave. II. Varied shock wave and cloud core parameters. *Astrophys J*, 2013, 770: 51
- 3 Russell S S, Srinivasan G, Huss G R, et al. Evidence for widespread ^{26}Al in the solar nebula and constraints for nebula time scales. *Science*, 1996, 273: 757–762
- 4 Greenberg J M, Li A. Morphological structure and chemical composition of cometary nuclei and dust. *Space Sci Rev*, 1999, 90: 149–161
- 5 Brownlee D. The stardust mission: analyzing, Ng samples from the edge of the solar system. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2014, 42: 179–205
- 6 Shu F H, Shang H, Gounelle M, et al. The origin of chondrules and refractory inclusions in chondritic meteorites. *Astrophys J*, 2001, 548: 1029–1050
- 7 Bockelee-Morvan D, Gautier D, Hersant F, et al. Turbulent radial mixing in the solar nebula as the source of crystalline silicates in comets. *Astron Astrophys*, 2002, 384: 1107–1118
- 8 Safronov V S. Evolution of the protoplanetary cloud and formation of Earth and the planets, NASA Tech Transl. F-677. In: Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem: Keter Publishing House, 1972
- 9 Goldreich P, Lithwick Y, Sari R. Planet formation by coagulation: A focus on Uranus and Neptune. *Ann Rev Astrono Astrophys*, 2004, 42: 549
- 10 Weidenschilling S. Can gravitational instability form planetesimals? *Icarus*, 1995, 116: 433–435
- 11 Weidenschilling S. Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula. *Mon Notice Roy Astron Soc*, 1977, 180: 57–70
- 12 Kenyon S J, Luu J X. Accretion in the early solar system. *Astrophys J*, 1999, 526: 465–470
- 13 Jayawardhana R, Coffey J, Scholz A, et al. Accretion disks around young stars: Lifetimes, disk locking, and variability. *Astrophys J*, 2006, 648: 1206–1218
- 14 Johansen A, Henning T, Hubert K. Dust sedimentation and self-sustained Kelvin-helm jolts turbulence in protoplanetary disk mid planes. *Astrophys J*, 2006, 643: 1219–1232
- 15 Johansen A, Oishi J S, Mac Low M M, et al. Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks. *Nature*, 2007, 448: 1022–1025
- 16 Morbidelli A, Bottke W F, Nesvorny D, et al. Asteroids were born big. *Icarus*, 2009, 204: 558–573
- 17 Davis D R, Farinella P. Collisional evolution of Edgeworth-Kuiper belt objects. *Icarus*, 1997, 125: 50–60
- 18 Rickman H, Marching S, A'Hearn M F, et al. Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Constraints on its origi from OSIRIS observations. *Astron Astrophys*, 2015, 583: A44
- 19 Bieler A, Altwegg K, Balsiger H, et al. Abundant molecular oxygen in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Nature*, 2015, 526: 678–683
- 20 Rubin M, Altwegg K, van Dishoeck E F, et al. Molecular oxygen in Oort cloud comet 1P/Halley. *Astrophys J Lett*, 2015, 815: L11
- 21 Johnson R E, Jesser W A. O_2/O_3 micro atmospheres in the surface of Ganymede. *Astrophys J*, 1997, 480: L79–L82
- 22 Lee J E, Bergin E A, Nomura H. The solar nebula on fire: A solution to the carbon deficit in the inner solar system. *Astrophys J Lett*, 2010, 710: L21–L25
- 23 Font A S, McCarthy I G, Johnstone D, et al. Photoevaporation of circumstellar disks around young stars. *Astrophys J*, 2004, 607: 890–903
- 24 Jura M, Young E D. Extrasolar cosmochemistry. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2014, 42: 45–67
- 25 Lammer H, Lichtenegger H I M, Kulikov Y N, et al. Coronal mass ejection (CME) activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets, II. CME-induced ion pick up of Earth-like exoplanets in closed-in habitable zones. *Astrobiol*, 2007, 7: 185–207

New insights to the planetary formation process

IP WingHuen

Institute of Astronomy, Central University, Taoyuan 32001

Recent advances in space exploration of comets which are the most primitive objects in the outer solar system and numerical simulations have brought new insights to the history of solar system formation. The new idea of the pebble accretion mechanism might lead to possible solutions to the rapid formation of the planetary system. The detection of a large amount of oxygen molecules in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko has also important implication on the initial environment of the molecular cloud and the solar nebula. Finally, the presence of meteoritic material in the dust grains of comet 81P/Wild 2 has raised the possibility of large-scale mass transport in the early solar nebula which might be associated with magnetohydrodynamic process.

solar nebula, pebble accretion, cometary exploration, exoplanets, planet nine

doi: 10.1360/N972016-00118



叶永烜

中央大学天文所教授, 香港中文大学学士(1969年), 美国匹兹堡大学硕士(1970年), 美国 UCSD 博士(1974年). 曾任职(1978~1998年)德国马普太阳系研究所(前身是高空大气研究所), 现任职澳门科技大学太空研究所特聘访问教授. 研究专长为行星和太阳系小物体起源和构造, 太阳系电浆物理等课题.