

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.03.01

行星大样本演化的研究进展

李思楠^{1,2,3}, 贾石^{1,2,3}, 余聪⁴

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 天体结构与演化重点实验室, 昆明 650011; 4. 中山大学 物理与天文学院, 珠海 519082)

摘要: 大样本演化方法是天体物理研究的重要方法, 被广泛应用在恒星物理研究中。随着系外行星观测样本的大量积累, 该方法也开始被用于行星统计特征的研究。行星大样本演化方法就是通过简化的行星形成演化模型, 对大量初始条件(原行星盘参数)和边界条件(星周环境)同时进行模拟, 以给出行星的各种统计性质, 并直接与观测上的行星样本统计特征做比较。该方法对于建立行星形成和演化的理论模型具有重要意义。对行星大样本演化模型进行了概述, 并简要介绍了行星大样本演化的主要统计结果和最新进展。此外, 还对其未来发展作出了展望。

关键词: 行星大样本演化; 行星形成理论; 行星演化理论

中图分类号: P155 **文献标识码:** A

1 引 言

1992 年天文学家发现了围绕在脉冲星 PSR B1 257+12 周围的第一颗系外行星^[1]。1995 年第一颗围绕在主序星周围的系外行星 51 Pegasi b 被发现^[2]。随后 20 多年来, 被搜寻到的系外行星数量持续增加, 特别是随着开普勒空间望远镜 (Kepler Space Telescope) 的发射升空, 天文学家通过凌星方法 (transit method) 观测到了大量系外行星候选体^[3]。目前已有超过 4 000 颗系外行星得到了证认^[4], 这些系外行星具有千差万别的质量、半径、成分和轨道根数^[5]。通过阿塔卡马大型毫米波天线阵 (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array, ALMA) 和赫歇尔空间天文台 (Herschel Space Observatory) 等射电和红外望远镜的巡天或高分辨率观测, 天文学家对具有不同年龄、环境、演化阶段和中央恒星质量的原行星盘的特征和结构进行了深入研究^[6, 7]。同时, 行星形成的理论模型和数值模拟研究也在快速发展中^[8, 9]。随着所发现的系外行星和原行星盘样本数量的增加以及理论的发展, 大样本演化的研究方法在行星形成和演化的研究中变得越来越重要, 并逐步得到广泛应用。

收稿日期: 2018-11-13; 修回日期: 2019-07-01

资助项目: 国家自然科学基金 (11373064, 11521303, 11733010, 11873103, 11733008); 云南省应用基础研究计划 (2014HB048); 云南省基金 (2017HC018)

通讯作者: 李思楠, snli0422@gmail.com

大样本演化 (population synthesis) 方法是天体物理中常用的方法, 在恒星演化的研究中已经取得重要成果^[10]。恒星大样本演化 (binary population synthesis) 方法就是通过对大量包括单星和双星的恒星系统同时进行演化, 并在统计性质上将模拟结果与观测结果直接进行比较。利用恒星大样本演化方法, 天文学家进一步完善了恒星演化理论, 也解释了许多特殊恒星的演化过程^[11-13]。行星大样本演化 (planet population synthesis) 方法是基于行星形成模型 (以核吸积模型为主) 的研究方法, 其基本思想是在大量不同的初始条件 (原行星盘参数) 和边界条件 (星周环境) 下, 大量行星按照相同的行星形成模型同时进行演化, 所得到的行星样本统计特征再与观测结果进行比较^[14]。行星大样本演化的不同初始条件 (原行星盘参数) 和统计特征 (行星样本分布) 之间的相关性研究有助于我们对行星形成过程的理解, 并有助于对行星的多样性和分布特征做出一些预测^[15]。

2 方法介绍

单一行星系统的多维流体动力学数值模拟需要大量的计算资源^[16], 因此, 该方法并不适用于行星大样本演化。行星大样本演化方法需要对大量行星系统的 10^6 a 量级的形成过程和 10^9 a 量级的演化过程进行模拟, 并要同时保证计算的精度和速度, 因此, 对物理过程的描述要求既准确, 又尽可能简化, 以保证计算的效率。行星大样本演化方法一般采用行星形成的核吸积模型, 所涉及的物理过程一般通过从二维或三维数值模拟中提炼出的近似参数化经验公式来描述, 或者通过求解低维近似的微分方程得到的半解析全局模型 (global model) 来描述^[14]。行星形成的核吸积模型所描述的行星形成过程大致为: (1) 原行星盘内的尘埃凝结成星子。(2) 星子之间发生碰撞、聚合, 形成行星胚胎。(3) 行星胚胎与原行星盘相互作用并吸积气体: 原行星核若在盘消散前其质量达到临界质量, 则将失控式吸积气体, 形成气态巨行星; 若没有吸积到足够气体, 则将形成类地行星。(4) 原行星盘气体逐渐消散, 行星与中央天体及其他固体残留物相互作用, 演化到目前观测到的状态。

目前发展比较完善的行星大样本演化模型主要有两种: 一种由 Ida 和 Lin^[17-23] 所建立, 简称为 IL 模型; 另一种由 Alibert, Mordasini 和 Benz 等人所发展^[24-32]。由于第二种模型的大多数合作者来自伯尔尼大学, 因此, 该模型也被称作伯尔尼模型 (Bern model)^[14]。

IL 模型是一个围绕类太阳恒星的行星的形成全局模型。最初的 IL 模型包含了行星形成过程中的所有基本过程, 他们假设每个原行星盘中有一个行星胚胎, 同时, 他们还考虑了行星形成中的星子吸积、气体吸积和 II 型迁移过程。IL 模型采用幂律形式的原行星盘结构, 初始条件由蒙特卡罗方法选取。通过 IL 模型可得到行星样本最重要的几个统计特征, 如行星质量随半长径的分布, 以及中央恒星的金属丰度^[18] 和恒星质量^[18] 对行星分布的影响等。后来, 他们在 IL 模型中加入了更多物理效应: (1) I 型迁移^[20]; (2) 雪线处的尘埃丰度不连续性^[21]; (3) 行星胚胎和演化中的气体盘的相互作用, 以及行星间的散射和共振作用^[22]; (4) 多行星系统中的动力学不稳定性^[23]。

在 IL 模型中, 很多物理过程采用了幂律的经验公式来描述, 而伯尔尼模型对原行星盘

的结构演化以及行星的内部结构进行了更细致的(偏)微分方程求解(这也导致了更多的计算成本)。最初的伯尔尼模型也假设一个原行星盘中有一个行星胚胎。关于多行星系统的形成, Alibert 等人^[30]后来采用了包括碰撞探测的 N 体模拟来研究行星系统在 10^9 a 量级时标的轨道演化。同时, 为了更好地研究行星形成模型与观测到的行星特征间的相关性, 他们在伯尔尼模型中加入了长时标的行星演化, 并考虑了行星的大气冷却收缩^[28], 从而可以用大样本演化模型得出行星的半径与光度的关系, 并使其直接与凌星及直接成像法得到的观测结果进行比较^[29]。此外, 他们在伯尔尼模型中还加入了行星气体包层演化过程中的大气逃逸, 考虑了驱动大气逃逸的辐射能量类型(X 射线或极紫外辐射)和加热效率的影响, 并发现行星半径分布呈现出蒸发低谷(evaporation valley)的特征^[31]。另外, 他们还分析了行星核的物质成分对蒸发低谷位置和半径双峰分布的影响^[32]。

除了上述两种主要模型外, 人们还在一些行星大样本演化工作中考虑了以下因素: (1) 原行星盘上物理性质转变的区域对行星形成和迁移的影响^[33-35]; (2) 原行星核形成机制中, 用石砾吸积(pebble accretion)取代星子吸积^[36](详见第 4.2 节); (3) 星团环境的辐射作用对行星系统的影响^[37]; (4) 采用引力不稳定模型来研究行星形成^[38, 39]。

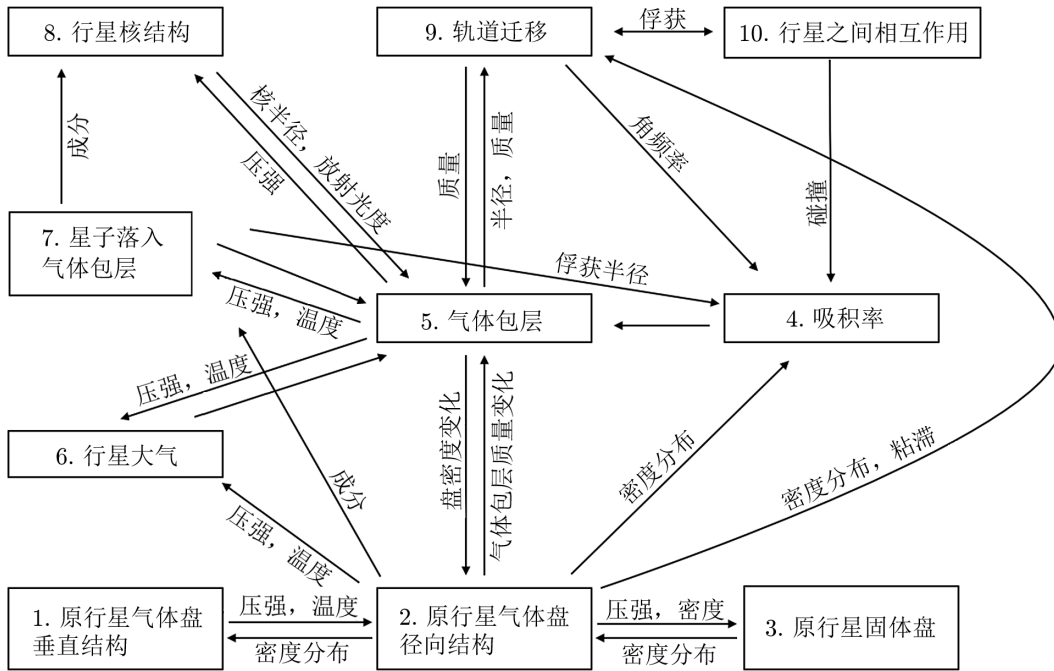
2.1 初始条件

行星形成于恒星周围的原行星盘中, 行星大样本演化的初始条件一般包括原行星盘的参数情况和原行星分布位置的设定。在红外和射电波段对原行星盘的观测数据为盘参数的选取给出了一些限定。然而, 由于原行星盘的内侧区域难以观测, 且盘观测数量有限, 因此, 初始盘参数的分布基本上还是由理论模型给出^[40-42]。原行星盘参数主要有盘的初始气体密度分布、固体尘埃密度分布和盘的寿命, 它们在大样本演化中用蒙特卡罗方法构造。原行星的形成位置也并非由模拟演化得出, 而是根据行星胚胎形成所需要的吸积供给区的位置, 将行星“种子”按一定分布(常采用对数分布^[43])放置到原行星盘中。这些原行星的质量则由行星胚胎快速吸积的结果得出。

2.2 物理过程

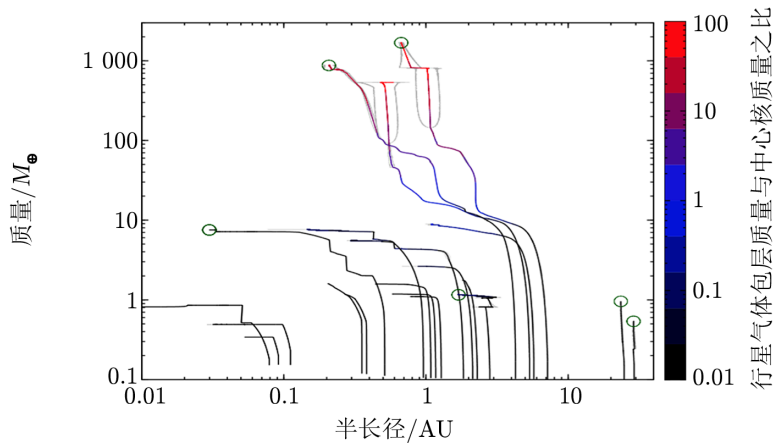
在行星大样本演化的模型中, 模拟的物理过程包括原行星盘中星子生长、吸积气体、形成行星、行星迁移、行星之间的相互作用, 以及行星与原行星盘的相互作用^[15], 如图 1 所示。在核吸积模型的基础上, 可以进一步加入的物理过程有行星核与大气的内部结构演化、星子和石砾在被吸积到行星核表面之前与气体包层的相互作用、中央恒星的演化以及演化过程中的大气损失。

为了更好地理解行星大样本演化的过程, 人们选取一个具体的系统, 以展示其中的行星形成演化过程^[14], 如图 2 所示。初始时系统中放入了 20 个质量为 $0.1 M_{\oplus}$ (M_{\oplus} 为地球质量)的行星胚胎, 它们最终演化为 2 个气态巨行星、1 个热海王星, 以及 1 个内轨道和 2 个外轨道的小质量行星。轨道迁移和 N 体相互作用等效应均在图中有所体现: 初始阶段固体吸积时标远小于迁移时标, 行星质量增大而轨道半长径不变, 此时物质组成成分以固体核为主。随着质量的增大, 固体吸积时标变长, 迁移时标变短, 有许多行星质量几乎不再增大, 而是向内进行 I 型迁移。当原行星核质量足够大, 以致引发失控式气体增长时, 行星质量快



注：模块 1—3 表示原行星盘的结构和演化；模块 4—7 表示行星的形成，其中，模块 4 是行星的固体吸积，模块 5 和 6 是气体吸积（模块 6 中考虑了行星核达到临界质量前，受原行星盘参数影响的气体包层边界），模块 7 中考虑了气体包层在质量足够大时对其中心下落星子的影响；模块 8 是行星核的结构；模块 9 和 10 表示行星演化过程中的行星迁移和行星与行星间的相互作用。箭头表示各模块之间的关系。

图 1 在行星大样本演化中采用的行星形成核吸积模型及其物理过程间的耦合关系示意图^[15]



注：灰色曲线表示行星激发轨道偏心率后近日点与远日点的位置；圆圈表示最终保留在系统里的行星的位置。

图 2 质量-半长径关系图中的行星形成轨迹^[14]

速增加, 此时大气相对固体核的质量比例显著增大。最后, 气态巨行星间的相互作用激发了轨道偏心率, 造成轨道重叠, 其中一个巨行星被弹射出系统。小质量行星在动力学相互作用下可能被弹射出系统, 或与其他行星并合, 只有一部分小质量行星能幸存下来。

3 结果展示

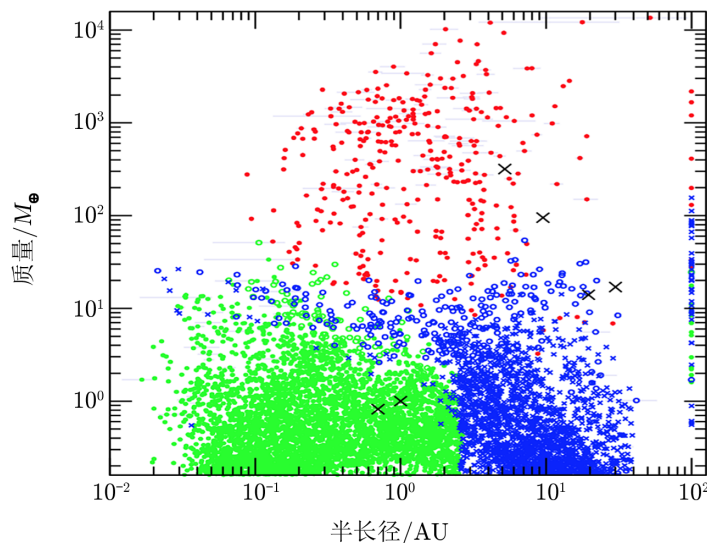
3.1 大样本演化结果

大样本演化的结果显示, 行星系统的种类具有多样性, 例如, 大部分系统只包含小质量行星, 这些系统大多为多行星系统; 有一部分系统拥有气态巨行星; 同时具有气态巨行星和小质量行星的系统很少; 还有一部分系统只含有气态巨行星^[14]。

通过行星大样本演化方法还可以得出行星族群的许多统计特征, 例如, 行星的质量-半长径分布、半径-半长径分布, 以及质量、半径、光度随半长径的分布等。下面我们以伯尔尼模型的结果为例, 选取其中较为重要的几方面进行具体介绍, 并与观测结果进行比较。

3.1.1 行星质量-半长径分布

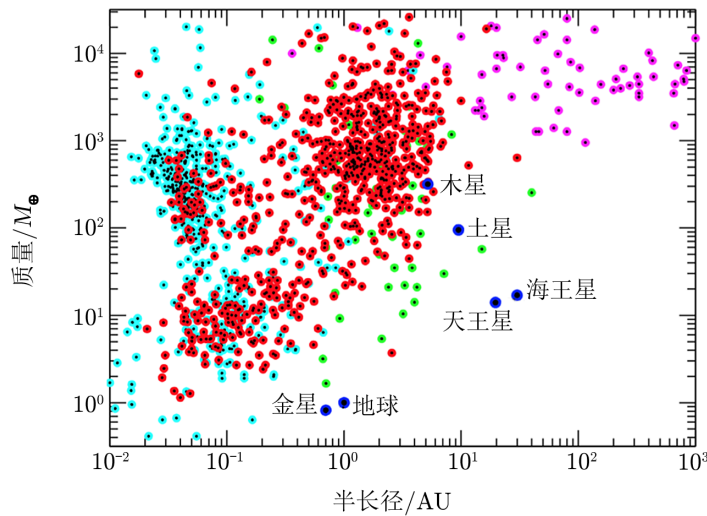
行星大样本演化的最重要结果之一是行星的质量-半长径分布, 其重要性相当于恒星物理中的赫罗图^[17]。图 3 展示了 504 个行星系统中行星的质量随半长径的分布, 其中在初始时每个系统中放入了 20 个质量为 $0.1M_{\oplus}$ 的行星胚胎。由图 3 可以看出, 行星大样本演化结果中有大量小质量行星。小质量行星的普遍存在首先由 IL 模型于 2004 年预言^[18], 并且在后续的高精度视向速度观测和开普勒空间望远镜凌星观测中得到了证实。



注: 点的颜色表示了行星的物质成分, 符号反映了行星大气与核的质量比 f : 红色点表示 $f > 1$ 的气态巨行星; 蓝色点表示行星具有较多的冰质成分, 蓝色圆圈和叉号分别表示 $0.1 < f < 1$ 和 $f < 0.1$; 绿色点表示行星为类地成分, 绿色空心和实心圆圈分别表示 $0.1 < f < 1$ 和 $f < 0.1$ 。黑色叉号表示太阳系内行星的位置。

图 3 行星大样本演化的质量-半长径分布^[14]

图 4 展示了观测上发现行星的质量-半长径分布。演化的行星质量-半长径分布范围较广，覆盖了大部分 (但并不是全部) 观测到的系外行星样本的参数空间。



注：红色、蓝色、品红色和绿色的点分别表示用视向速度、凌星、直接成像和微引力透镜观测方法发现的系外行星。

图 4 行星观测样本的质量-半长径分布^[14]

通过分析行星大样本演化的结果，我们发现在靠近中央恒星的小质量行星中，其物质组成以类地 (Earth-like) 成分为主，它们形成于雪线以内，没有吸积易挥发的冰质物质。海王星质量量级的短周期行星拥有较大比例的冰质成分，由此可以推断出它们是在雪线以外形成，然后向内迁移到邻近其主星的轨道。在其向内迁移的过程中，其对岩质星子的吸积会使得其冰质成分比例降低，这与在雪线外的类海王星行星有较大区别。气态巨行星在轨道半长径 1 AU 附近分布较多，如图 3 所示。气态巨行星较容易在雪线以外形成，并经过向内迁移运动到达最终稳定的轨道上。从图 3 还可以看出，从大样本演化可得到大量距离主星较远的小质量行星。然而相应的观测样本却很少，如图 4 所示，这可能是由于观测的选择效应所导致。观测样本的完善还需要观测技术和设备的发展。太阳系内的行星基本上落在行星大样本演化所得的参数范围内，土星和海王星略在演化族群之外，这可能是由于大样本演化的行星系统在演化早期结构更加致密引起的^[14]。

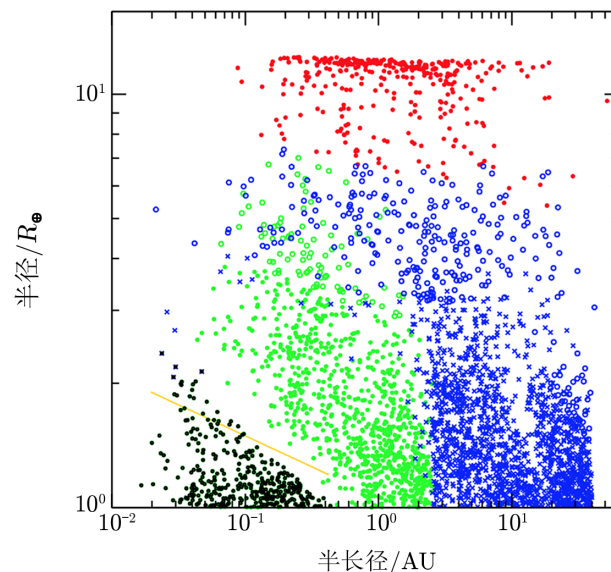
早期的 IL 模型给出了中等质量 ($30M_{\oplus} \sim 100M_{\oplus}$) 行星缺失的预测，该预测被称作行星荒漠 (planetary desert)^[17]。根据行星形成核吸积模型，原行星核通过吸积达到其临界质量后会失控式吸积气体，从而快速长成气态巨行星，导致在亚临界质量 (sub-critical mass, 行星核质量约小于 $10M_{\oplus}$) 与气态巨行星质量间的行星分布很少^[44]。但是，在观测和后续用伯尔尼模型得到的质量-半长径分布中，并没有足够明显的中等质量行星缺失。中等质量行星可能会在如下三种情形下形成^[44]：(1) 星子吸积的热量使得气体吸积的开尔文-亥姆霍兹时标随着行星质量增加并没有显著减小，行星长成气态巨行星需要的时间比以往认为的长 (行

星质量可能因气体盘消散而停留在中等质量程度); (2) 原行星核质量达到临界质量时气体盘密度很可能已极大地减小, 这限制了气体的快速吸积, 使行星无法形成巨行星而成为中等质量行星; (3) 相对于早期一个原行星盘中有一个行星胚胎的假设, 多行星胚胎在演化中存在固体物质与气体物质吸积上的竞争, 从而导致更多中等质量行星的形成。

3.1.2 行星半径-半长径分布

人们利用 COROT 系外行星探测器^[45]和开普勒空间望远镜, 通过凌星观测获得了大量系外行星候选体的半径数据。在行星大样本演化中, 人们可根据行星所吸积的物质类型和行星内部结构方程, 获得行星的半径^[29], 并与观测结果直接对比。

在原行星盘消散后, 行星大气冷却收缩和恒星辐射造成的大气逃逸作用(蒸发效应)都会引起行星半径的变化。图 5 给出了行星演化到 5×10^9 a 时的半径-半长径分布。从图中可以看出, 行星半径-半长径分布有两个突出特征: (1) 大量气态巨行星的半径在 $10 R_{\oplus} \sim 12.4 R_{\oplus}$ (R_{\oplus} 为地球半径) 的范围内, 即与木星半径差不多。这是由于木星质量级别的行星, 其内部的氢氦物质已经成简并的状态, 因此, 质量介于土星到褐矮星质量之间的气态巨行星半径基本为常数, 大约为一个木星半径的大小^[46]。该特征在早期开普勒空间望远镜的观测数据中不够明显, 但是随着观测样本的增加, 该特征已被确认^[47]。同时需要注意的是, 观测上发现大量膨胀的热木星, 其形成机制目前还未得到合理地解释^[48]。(2) 半径较小的行星的分布随着半长径增加有空隙存在, 这是由于考虑了蒸发效应所导致的^[31, 32](详见 4.1 节)。这种小质量行星在半径约小于 $4R_{\oplus}$ 处的分布特征在最新的观测中已被确认^[49, 50]。



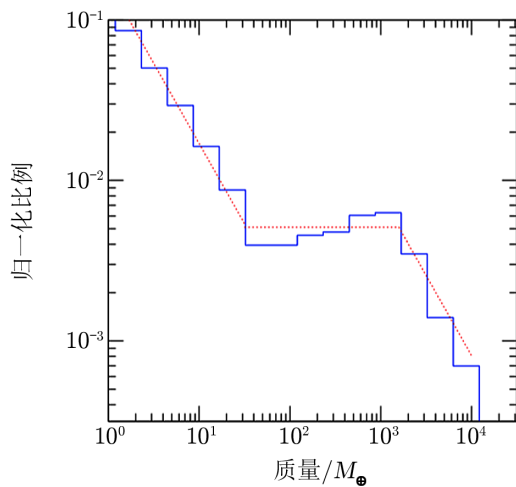
注: 点的颜色和符号含义同图 3。黑色空心圆圈代表光致蒸发效应下完全损失气体包层的行星。

图 5 行星大样本演化的半径-半长径分布^[14]

3.1.3 行星质量函数

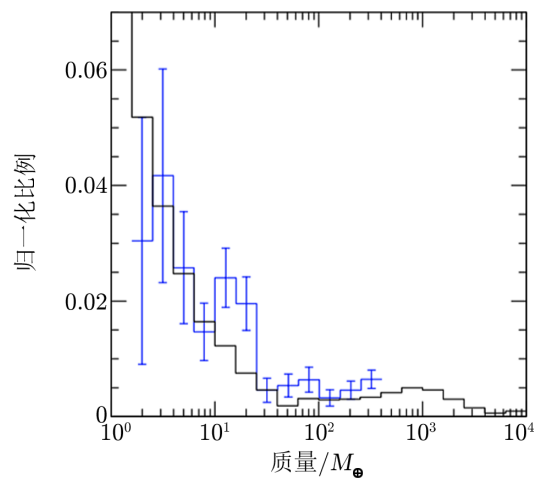
确定行星质量函数 (planetary mass function) 是大样本演化方法的一个核心目标。如图 6 所示, 行星质量分布大致可以分为两个区域: 小质量、固体成分为主的行星和大质量的气态巨行星。行星质量函数在约 $30M_{\oplus}$ 处中断, 这对应着核吸积理论的重要特征——存在触发气体失控式吸积的临界核质量。当行星质量小于该临界质量时, 行星形成主要由固体吸积主导; 当行星质量大于该临界质量时, 行星形成由气体吸积主导。

图 7 展示了用大样本演化方法得到的行星质量函数与观测数据的对比。观测数据来自 HARPS 高精度视向速度巡天^[51], 大样本演化的质量和轨道距离范围数据选取了与观测样本相同的数据。大样本演化的结果与观测数据吻合得很好, 例如, 大样本演化结果中, 行星质量为 $30M_{\oplus}$ 处的中断和中断两侧区域行星质量函数的斜率都与观测数据相一致。这一结论也是对核吸积理论的重要支持。



注: 蓝色实线表示大样本演化结果中行星质量的分布函数; 红色虚线近似拟合了行星质量函数的斜率。

图 6 用行星大样本演化得到的行星质量函数^[14]

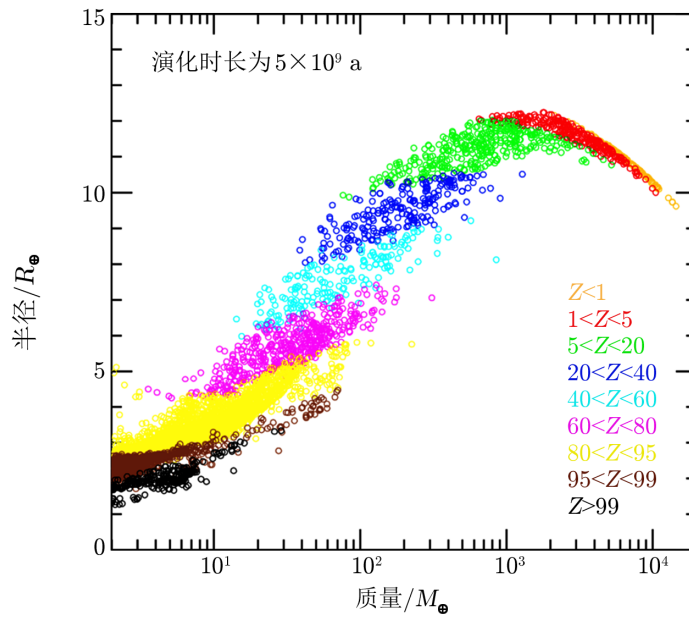


注: 蓝色和黑色的线分别代表行星观测和大样本演化的结果。

图 7 观测数据与用行星大样本演化得到的行星质量函数的对比^[14]

3.1.4 行星质量-半径关系

随着对行星的多波段测光和光谱观测的发展, 对行星平均密度和大气成分等物理量的精确测定成为可能。在行星的质量-半径关系图中, 大样本演化行星的物质成分也有所体现。如图 8 所示, 质量-半径的分布大致呈 S 形, 在小质量大半径和大质量小半径处都有所缺失^[29]。小质量的行星核在吸积大气时开尔文-亥姆霍兹时标较长, 其最终演化成的行星仍然是以固体成分为主, 半径和质量均相对较小。达到临界质量的行星核在盘消散前吸积大量气体, 成为气态巨行星, 其重元素比例较小, 且质量和半径都较大。原行星核吸积气体的速率依赖于原行星大气的不透明度, 比较观测与模拟的质量-半径关系将有助于我们对不透明度的限定。

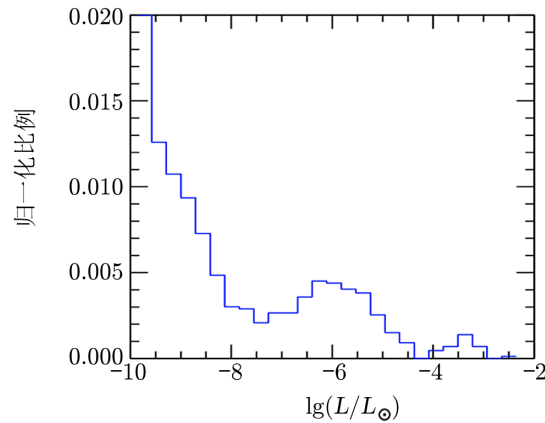


注: 空心圆圈表示行星大样本演化的结果; 不同颜色代表不同的重元素质量比例 Z 。

图 8 行星大样本演化的质量-半径关系^[15]

3.1.5 行星光度分布

行星的光度分布如图 9 所示。光度分布呈现 3 个峰值。因为质量 M 与光度 L 呈幂律形式的近似关系, 即 $L \propto M^2$, 因此, 前两个峰值对应着质量函数的两个极大值。第三个峰是由氦燃烧的行星引起的^[52]。



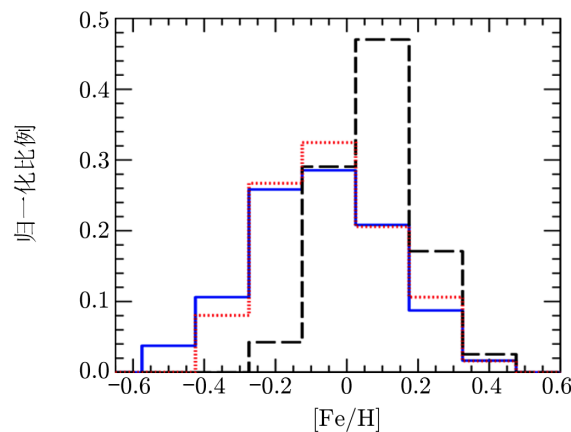
注: 选取了大样本演化到 2×10^7 a 时的结果, 光度分布呈现 3 个峰值。 L_{\odot} 为太阳光度。

图 9 行星大样本演化的光度分布^[14]

3.2 对物理效应的限定和解释

3.2.1 金属丰度效应

行星大样本演化方法的一个重要作用是理解原行星盘参数对行星形成过程的影响。人们通过观测发现，在金属丰度高的恒星周围较容易发现热木星，这一现象被称为金属丰度效应 (metallicity effect)^[53, 54]。行星大样本演化结果表明，金属丰度效应是核吸积模型的自然结果^[19, 25]。在中央恒星与原行星盘的金属丰度为正相关关系的假设下，在富金属恒星的周围，相同质量的原行星盘拥有较多的固体物质质量，因此，该行星的核质量能够在较短时间达到临界质量。这将有利于气态巨行星的形成。图 10 为采用与观测数据一致的金属丰度分布得出的行星大样本演化结果图。由图可以看出，拥有气态巨行星的恒星金属丰度明显偏高，而类地行星在恒星周围的分布与恒星金属丰度分布并没有表现出明确的相关性^[15]。



注：蓝色实线表示大样本演化中所有行星系统的中央恒星金属丰度分布，其初始值来自于太阳周围观测到的恒星金属丰度；黑色长虚线表示半半径 1 AU 内至少含有一个气态巨行星的恒星的金属丰度分布，它们在图中的分布相对集中在金属丰度较高的地方；红色点线表示至少拥有一个质量为 $1M_{\oplus} \sim 10M_{\oplus}$ 的小质量行星的恒星金属丰度分布，它们在金属丰度较高的地方分布相对较少。

图 10 行星大样本演化中的中央恒星金属丰度分布^[15]

此外，行星大样本演化的结果还表明，原行星盘的参数与行星系统有更多的相关关系^[27]：气态巨行星的质量与原行星盘的气体质量相关，质量较大的原行星盘能够形成质量较大的气态巨行星；气态巨行星的质量与原行星盘金属丰度不相关，但是，原行星盘金属丰度非常低时，大质量的气态巨行星无法形成；当原行星盘寿命增加时，气态巨行星的出现频率和质量都将增大。

3.2.2 轨道迁移

通过把具体的物理过程加入到行星大样本演化中，我们可以从大样本演化结果与观测数据的比较探讨该物理过程的效应，加深对行星形成理论的理解。理论的完善同时又促进着行星大样本模型的发展。例如，行星的 I 型迁移会使行星胚胎向内迁移，从而被中央恒星吸积，这不利于较大质量行星胚胎的积累，继而影响到气态巨行星的形成概率和分布。然而通过线性力矩分析得出的迁移率太高，很难与观测到的行星分布进行比较^[55]。考虑 I 型迁移

的行星大样本结果表明, 即使 I 型迁移时标很短, 仍会有行星形成, 并在演化中不被恒星吞噬而存活下来。但是, 要想模拟重复观测到的行星轨道分布和热木星在恒星周围的出现概率, I 型迁移模型的迁移率^[56]需要降低到原来的 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ ^[18, 25]。这说明在 I 型迁移模型的描述中缺失了一些会使迁移率显著减小的物理效应, 从而促进了对非等温的 I 型迁移的研究。非等温原行星盘中的共转力矩可以造成向外的迁移^[57], 并在向内和向外迁移区域的边界, 形成加强大质量行星形成的迁移陷阱。在采用改进的 I 型迁移模型后, 行星大样本演化的结果更接近观测到的行星轨道半长径分布^[58]。I 型迁移的相关研究工作正体现了行星形成理论与大样本演化的相互促进作用。

4 新的发展

4.1 光致蒸发效应

短周期行星非常靠近其中央恒星, 会受到较强的恒星辐射作用, 因此, 具有富氢氦气体包层的行星有较强的大气逃逸现象, 例如, 在紫外波段的凌星观测中已发现类海王星质量的系外行星 GJ 436b 有氢的逃逸现象^[59]。位置足够靠近中央恒星的小质量行星, 因为所受到的恒星辐射能大于气体包层的结合能, 其大气有可能完全被蒸发剥离, 最后留下固体核。而在固体行星核外占总质量 0.1% ~ 10% 的行星大气, 也会造成其半径上 5% ~ 60% 的显著增长^[60], 因此, 行星半径分布在大约 $2R_{\oplus}$ 的附近有一定的缺失, 该现象被称为蒸发低谷^[61, 62]。

早期的行星大样本演化模型中没有包含光致蒸发效应, 因此, 其模拟结果中, 半径分布在大于 $2R_{\oplus}$ 的部分与观测数据较为相似, 但小于 $2R_{\oplus}$ 的部分模拟结果低于观测值^[28, 29]。在考虑了光致蒸发效应后, 行星大样本演化结果呈现出明显的蒸发低谷^[31, 32]: 在 $1.5R_{\oplus}$ 处存在局部极小值; 约 $1R_{\oplus}$ 和 $2R_{\oplus} \sim 3R_{\oplus}$ 处有局部极大值, 分别对应于完全损失大气的行星和仍保留部分原初氢氦气体包层的行星。

随着加利福尼亚-开普勒巡天 (California-Kepler Survey, CKS) 项目的开展, 人们重新精确测量了大量开普勒行星的半径参数^[50], 从而验证了小质量、短周期行星半径分布的双峰结构。这说明在小质量短周期行星的演化过程中, 光致蒸发效应是不可忽略的^[63]。

4.2 石砾吸积

在经典的核吸积模型中, 固体物质形成原行星核的过程主要以星子吸积的形式进行, 而在最小质量太阳星云模型的盘参数下, 千米尺度的星子吸积成核的时标比原行星盘寿命长, 不足以在盘消散前长大到气体失控式吸积所需要的约 $10M_{\oplus}$ 的临界质量, 因而也就难以形成类木行星。为了提高星子吸积效率, IL 模型中假设了大于最小质量太阳星云模型值的固体盘密度^[18]。有人通过最近几年发展起来的石砾吸积模型^[64], 论证了通过吸积与气体耦合较弱的 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ m 尺度的石砾, 可以快速形成行星核。这一观点被天文学家广泛接受。石砾吸积也有助于在远离中央恒星的位置形成气态巨行星和冰巨行星。在新的行星大样本演化模型中, 人们采用石砾吸积模型代替星子吸积模型^[36]。此外, 新的行星大样本演化模

型中,人们采用二维数值模拟计算类太阳恒星周围吸积盘的结构,描述由于不透明度转变造成的盘参数波动,并对之前模型中幂律形式的盘结构和演化进行了优化。人们从模拟结果发现,行星系统的演化结果还依赖于行星胚胎在系统中出现的时间^[36]。石砾吸积模型的提出进一步完善了行星核吸积模型。

4.3 行星的频度

行星的频度 (planet occurrence rate) 有两种不同的含义: 每颗恒星周围的平均行星数和拥有行星的恒星所占的比例。前者可通过计算单个行星发生凌星的概率获得, 这仅涉及到行星的轨道周期; 而后者需要计算给定恒星至少拥有一颗行星的概率, 因此, 除了行星的轨道周期, 还涉及到所有行星的轨道倾角。两种行星频度数值只有当所有行星系统都仅有一颗行星时才会相等^[65]。

因为模拟中 N 体相互作用的演化时间有限, 从而使得晚期的一些行星碰撞散射未被考虑, 因此, 大样本演化得到的多行星系统的行星频度可以看作一个上限。大样本演化得到的具有气态巨行星的恒星比例为 18%^[14], 与观测得到的 10% ~ 20% 保持一致^[51]。轨道周期不大于 100 d 的近邻行星以小质量行星为主, 这在大样本演化系统中较为普遍。具有近邻行星的恒星比例约为 54%, 其多重度 (multiplicity) 也较高, 在具有此类行星的系统中平均数量为 3^[14]。形成高频度的近邻行星需要原行星盘星子分布更向中心聚集, 这对星子的形成分布模型也提供了限定^[66]。

早期的观测分析结果中, 超过 50% 的类太阳恒星周围有开普勒类型的行星 (半径不小于地球半径, 轨道周期小于 400 d)^[5]。而考虑了行星系统构型的新结果中, 该比例减小到约 30%^[65]。观测上对行星频度的精确测定将促进大样本演化模型的进一步完善。

4.4 行星系统的构型特征

开普勒行星样本中, 系统构型存在一些较为明显的二分性。所谓开普勒二分性 (Kepler dichotomy)^[67], 是指行星系统呈现两种类型: (1) 具有小轨道倾角的多行星系统, 观测上有不少于一个凌星行星; (2) 轨道倾角较大的含有较少数量行星的系统, 在观测上对应着大量单凌星系统。偏心率二分性 (eccentricity dichotomy) 是指开普勒单凌星系统有着相对较大的偏心率, 多凌星系统则有更接近于共面的圆轨道^[68]。

关于系统构型的起源有多种解释。初始原行星盘不同质量和表面密度的星子分布可以对行星系统的多重度、轨道倾角和偏心率产生较大影响, 形成相应的系统构型^[69]。演化中系统的动力学不稳定性也会对系统构型产生较大的影响, 如行星大碰撞 (giant impact)^[70] 和外侧巨行星的散射作用^[71]。

4.5 系外行星的光谱研究

对系外行星的光谱观测为行星大气的研究提供了有效途径, 这在丰富行星样本数据方面是其他观测手段所难以比拟的。由于行星大气物质在不同波段的吸收和散射不同, 行星在掩食过程中的有效半径也会随波长变化, 透射光谱 (transmission spectrum) 即展示了行星掩食深度随波长的变化^[72]。在次食前后行星的白昼侧和恒星可同时被观测到, 用此时的光谱减去只有恒星可见的次食光谱, 我们可以获得反映行星白昼侧的发射光谱 (emission

spectrum)^[72]。通过对光谱谱线和谱带的观测和识别, 我们可以得到行星大气的化学成分和热学结构的信息^[73]。通过这些信息, 我们可以对行星形成和演化的历史做出独特的限制。

结合行星大气模型和化学演化的大样本演化结果, 人们发现星子碰撞造成的大气增丰是影响最终热木星大气成分的主导因素^[74]。有人通过观测发现了大气碳氧比例较高的热木星。他们利用大样本演化得到的热木星样本, 讨论行星的化学演化和迁移, 发现比起在原行星盘中迁移的机制, 动力学作用下运动到近邻轨道的热木星更可能具有高碳氧比^[75]。需要注意的是, 模型中对原行星盘和行星的化学演化有许多简化和假设。要更精确地建立行星形成历史与大气成分之间的联系, 仍有待于观测和理论的进一步发展。

5 结论与展望

在行星大样本演化模型的研究中, 我们基于行星形成的核吸积模型, 结合观测数据和数值模拟研究, 采用简化的物理过程, 从大样本的初始条件(原行星盘初始参数)和边界条件(星周环境等)出发, 对行星样本进行演化, 并给出了行星系统的统计性质^[76]。行星大样本演化模拟不仅可以重现观测的统计特征, 而且还可以对未来观测做出一些预测。在高精度视向速度巡天与开普勒凌星观测之前, 天文学家便预言了小质量行星的广泛存在^[17]。通过大样本演化方法, 我们可以对相关的物理效应进行检验, 从而进一步完善行星形成理论模型。在未来的研究工作中, 人们还可以进一步完善行星大样本演化模型, 并把该模型应用到其他方面。

原行星盘的结构和演化: 目前的行星大样本演化模型中, 对原行星盘的处理仍比较简化, 而实际上原行星盘中气体和尘埃有着复杂的动力学演化过程^[8]。近几年来, 新物理效应的引入促进了原行星盘全局模型的发展^[77]。例如, 随着非理想磁流体动力学效应的引入, 人们发现, 磁转动不稳定性(magnetorotational instability, MRI)会驱动原行星盘的吸积和演化, 盘中的角动量转移由磁盘风主导, 磁盘风物质损失会引起盘中尘埃-气体质量比的增加, 这有利于星子的形成^[78]。湍流驱动盘风会影响 I 型迁移的效率, 当盘风比黏性扩散作用强时, I 型迁移的效率会降低^[79]。人们在 ALMA 的观测结果中也发现了原行星盘更精细的特征, 例如环、盘缝、旋臂和不对称结构^[80, 81]。对原行星盘精细结构的形成^[82]以及精细结构附近尘埃生长聚集^[83]所做的模拟, 也为行星大样本演化模型的进一步发展提供了可参考的思路。

中央恒星的类型和演化: 在目前的大样本研究中, 中央恒星通常被直接设定为质量为 $1M_{\odot}$ 的类太阳恒星。大多数开普勒行星的主星质量为 $0.8M_{\odot} \sim 1.1M_{\odot}$ ^[31]。中央恒星的类型和演化影响着原行星盘的性质和演化。在统计上恒星类型与行星系统的结构也有一定的相关性。大质量 F 和 G 型恒星周围有较多大质量类木行星和较少类海王星行星, K 和 M 型矮星周围有较多类海王星行星和较少类木行星^[19, 26]。恒星的辐射会影响原行星盘的演化, 并导致近邻小质量行星的光致蒸发效应。目前对恒星辐射光度的计算也大多采用对太阳的观测值, 而实际上, 不同恒星的 X 射线辐射强度会有很大的差异^[84]。

行星与恒星的相互作用：恒星对行星存在着长期的引力、辐射和磁场作用，会影响行星的轨道、结构和演化。例如，在原行星盘消散后，由于缺少了盘气体对行星偏心率的阻尼作用，原来在近圆轨道运动的行星容易由于引力扰动被激发到高偏心率的轨道上。它们可能被弹射出系统外，也有可能是在潮汐圆化作用下成为短周期行星^[85]。恒星和行星之间的潮汐相互作用会周期性地扰动行星大气，潮汐耗散的热量会阻碍行星气体包层的冷却。潮汐引发的湍流扩散可以增加行星气体吸积的开尔文-亥姆霍兹时标，使得行星在盘消散前不能长大到临界质量，以致无法失控式吸积气体，这为超级地球的形成提供了一种可能途径^[86]。同时，恒星因吸积行星物质，其金属丰度可能会增大，自转速率可能会改变，这也会影响恒星的性质和演化。通过大样本演化模型，把恒星行星系统作为整体来研究，会有助于我们更好地理解行星的形成和演化。

双星与主序后恒星周围的行星系统：双星在恒星中占的比例高达约 50%。目前人们已发现环绕双星的系外行星^[87, 88]，这些样本中双星的类型和行星的参数呈现了极大的多样性。同时，人们还观测到了环绕双星的原行星盘^[89]。当太阳演化到主序后阶段，系内行星，尤其是地球的命运一直备受天文学家关注。白矮星作为中小质量恒星演化的最终状态，对其观测发现的红外超表明其周围存在固体碎片盘^[90]，一些白矮星表面的金属增丰现象也极可能是由于吸积行星物质引起的^[91]。人们在双白矮星周围也发现了行星^[92]。通过研究行星系统的瓦解^[93-95]、幸存以及可能存在的二代行星的形成^[96]，我们对行星恒星系统的认识将得到进一步拓展。

观测上的发展也推动着行星样本统计数据的完备和精确性，以及对理论模拟的检验和改进。例如，通过利用 LAMOST 的数据对开普勒行星的主星作精确分析，人们得到了优化的行星参数，并在短周期行星中发现了一类海王星大小的新的族群——热海星 (Hoptunes)^[97]。热海星有很多类似于热木星的特点，常分布在金属丰度高的恒星周围，且在单行星系统中出现的概率较大。对热海星进行大样本演化研究，将有助于我们了解其可能的形成通道。

随着凌星系外行星巡天望远镜 (Transiting Exoplanet Survey Telescope, TESS)^[98] 的发射升空，以及基奥普斯系外行星表征卫星 (Characterizing Exoplanet Satellite, CHEOPS)^[99]、柏拉图探测器 2.0 (Planetary Transits and Oscillations of Stars 2.0, PLATO 2.0)^[100] 和韦伯空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST)^[101] 项目的筹备，我们有望获得更全面的行星样本，以及更精确的行星质量和半径参数，以促进行星大样本演化模型的进一步发展。

参考文献：

- [1] Wolszczan A, Frail D A. *Nature*, 1992, 355: 145
- [2] Mayor M, Queloz D. *Nature*, 1995, 378: 355
- [3] Coughlin J L, Mullally F, Thompson S E, et al. *ApJS*, 2016, 224: 12
- [4] <http://www.exoplanet.eu/>
- [5] Winn J N, Fabrycky D C. *ARA&A*, 2015, 53: 409
- [6] Ansdell M, Williams J P, van der Marel N, et al. *ApJ*, 2016, 828: 46

- [7] Dent W R F, Thi W F, Kamp I, et al. *PASP*, 2013, 125: 477
- [8] 白雪宁. *天文学进展*, 2016, 34: 370
- [9] 余聪. *天文学进展*, 2016, 34: 385
- [10] Han Z. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2011, 3: 35
- [11] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. *MNRAS*, 2002, 336: 449
- [12] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. *MNRAS*, 2003, 341: 669
- [13] Han Z, Podsiadlowski P. *MNRAS*, 2004, 350: 1301
- [14] Mordasini C. *Handbook of Exoplanets*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018: 143
- [15] Benz W, Ida S, Alibert Y, et al. *Protostars and Planets VI*. Arizona: University of Arizona Press, 2014: 691
- [16] Baruteau C, Bai X, Mordasini C, et al. *Space Sci Rev*, 2016, 205: 77
- [17] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2004, 604: 388
- [18] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2004, 616: 567
- [19] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2005, 626: 1045
- [20] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2008, 673: 487
- [21] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2008, 685: 584
- [22] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2010, 719: 810
- [23] Ida S, Lin D N C, Nagasawa M. *ApJ*, 2013, 775: 42
- [24] Mordasini C, Alibert Y, Benz W. *A&A*, 2009, 501: 1139
- [25] Mordasini C, Alibert Y, Benz W, et al. *A&A*, 2009, 501: 1161
- [26] Alibert Y, Mordasini C, Benz W. *A&A*, 2011, 526: A63
- [27] Mordasini C, Alibert Y, Benz W, et al. *A&A*, 2012, 541: A97
- [28] Mordasini C, Alibert Y, Klahr H, et al. *A&A*, 2012, 547: A111
- [29] Mordasini C, Alibert Y, Georgy C, et al. *A&A*, 2012, 547: A112
- [30] Alibert Y, Carron F, Fortier A, et al. *A&A*, 2013, 558: A109
- [31] Jin S, Mordasini C, Parmentier V, et al. *ApJ*, 2014, 795: 65
- [32] Jin S, Mordasini C. *ApJ*, 2018, 853: 163
- [33] Hasegawa Y, Pudritz R E. *MNRAS*, 2011, 417: 1236
- [34] Hasegawa Y, Pudritz R E. *ApJ*, 2012, 760: 117
- [35] Hasegawa Y, Pudritz R E. *ApJ*, 2013, 778: 78
- [36] Bitsch B, Lambrechts M, Johansen A. *A&A*, 2015, 582: A112
- [37] Ndugu N, Bitsch B, Jurua E. *MNRAS*, 2018, 474: 886
- [38] Forgan D, Rice K. *MNRAS*, 2013, 432: 3168
- [39] Forgan D H, Hall C, Meru F, et al. *MNRAS*, 2018, 474: 5036
- [40] Lynden-Bell D, Pringle J E. *MNRAS*, 1974, 168: 603
- [41] Shakura N I, Sunyaev R A. *A&A*, 1973, 24: 337
- [42] Hayashi C. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 1981, 70: 35
- [43] Kokubo E, Ida S. *ApJ*, 2002, 581: 666
- [44] Ida S. *ISSI Scientific Reports Series*, 2006, 6: 115
- [45] Moutou C, Deleuil M, Guillot T, et al. *ICARUS*, 2013, 226: 1625
- [46] Chabrier G, Baraffe I, Leconte J, et al. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1094: 102
- [47] Petigura E A, Marcy G W, Winn J N, et al. *AJ*, 2018, 155: 89
- [48] Dawson R I, Johnson J A. *ARA&A*, 2018, 56: 175
- [49] Van Eylen V, Agentoft C, Lundkvist M S, et al. *MNRAS*, 2018, 479: 4786
- [50] Fulton B J, Petigura E A, Howard A W, et al. *AJ*, 2017, 154: 109
- [51] Mayor M, Marmier M, Lovis C, et al. *arXiv:1109.2497*
- [52] Mordasini C, Marleau G D, Mollière P. *A&A*, 2017, 608: A72
- [53] Gonzalez G. *MNRAS*, 1997, 285: 403

- [54] Fischer D A, Valenti J. *ApJ*, 2005, 622: 1102
- [55] Goldreich P, Tremaine S. *ApJ*, 1980, 241: 425
- [56] Tanaka H, Takeuchi T, Ward W R. *ApJ*, 2002, 565: 1257
- [57] Baruteau C, Crida A, Paardekooper S J, et al. *Protostars and Planets VI*. Arizona: University of Arizona Press, 2014: 667
- [58] Dittkrist K M, Mordasini C, Klahr H, et al. *A&A*, 2014, 567: A121
- [59] Ehrenreich D, Bourrier V, Wheatley P J, et al. *Nature*, 2015, 522: 459
- [60] Adams E R, Seager S, Elkins-Tanton L. *ApJ*, 2008, 673: 1160
- [61] Owen J E, Wu Y. *ApJ*, 2013, 775: 105
- [62] Lopez E D, Fortney J J. *ApJ*, 2013, 776: 2
- [63] Owen J E, Wu Y. *ApJ*, 2017, 847: 29
- [64] Lambrechts M, Johansen A. *A&A*, 2012, 544: A32
- [65] Zhu W, Petrovich C, Wu Y, et al. *ApJ*, 2018, 860: 101
- [66] Drazkowska J, Alibert Y, Moore B. *A&A*, 2016, 594: A105
- [67] Lissauer J J, Ragozzine D, Fabrycky D C, et al. *ApJS*, 2011, 197: 8
- [68] Xie J W, Dong S, Zhu Z, et al. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2016, 113: 11431
- [69] Moriarty J, Ballard S. *ApJ*, 2016, 832: 34
- [70] Dawson R I, Lee E J, Chiang E. *ApJ*, 2016, 822: 54
- [71] Huang C X, Petrovich C, Deibert E. *AJ*, 2017, 153: 210
- [72] Heng K, Showman A P. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 509
- [73] Højimakers H J, Ehrenreich D, Heng K, et al. *Nature*, 2018, 560: 453
- [74] Mordasini C, van Boekel R, Mollière P, et al. *ApJ*, 2016, 832: 41
- [75] Madhusudhan N, Amin M A, Kennedy G M. *ApJ*, 2014, 794: L12
- [76] Mordasini C, Mollière P, Dittkrist K M, et al. *International Journal of Astrobiology*, 2015, 14: 201
- [77] Turner N J, Fromang S, Gammie C, et al. *Protostars and Planets VI*. Arizona: University of Arizona Press, 2014: 411
- [78] Bai X N. *ApJ*, 2016, 821: 80
- [79] Ogiwara M, Morbidelli A, Guillot T. *A&A*, 2015, 584: L1
- [80] Andrews S M, Wilner D J, Zhu Z, et al. *ApJ*, 2016, 820: L40
- [81] Benisty M, Juhasz A, Boccaletti A, et al. *A&A*, 2015, 578: L6
- [82] Dong R, Zhu Z, Rafikov R R, et al. *ApJ*, 2015, 809: L5
- [83] Zhu Z, Stone J M, Rafikov R R, et al. *ApJ*, 2014, 785: 122
- [84] Güdel M. *A&A Rev*, 2004, 12: 71
- [85] Chatterjee S, Ford E B, Matsumura S, et al. *ApJ*, 2008, 686: 580
- [86] Yu C. *ApJ*, 2017, 850: 198
- [87] Doyle L R, Carter J A, Fabrycky D C, et al. *Science*, 2011, 333: 1602
- [88] Welsh W F, Orosz J A, Carter J A, et al. *Nature*, 2012, 481: 475
- [89] Trilling D E, Stansberry J A, Stapelfeldt K R, et al. *ApJ*, 2007, 658: 1289
- [90] Jura M, Farihi J, Zuckerman B. *ApJ*, 2007, 663: 1285
- [91] Bonsor A, Xu S. *Astrophysics and Space Science Library*, 2017, 445: 229
- [92] Qian S B, Han Z T, Fernández Lajús E, et al. *Journal of Physics Conference Series*, 2016, 728: 042006
- [93] Liu S F, Guillochon J, Lin D N C, et al. *ApJ*, 2013, 762: 37
- [94] Jia S, Spruit H C. *MNRAS*, 2017, 465: 149
- [95] Jia S, Spruit H C. *ApJ*, 2018, 864: 169
- [96] Völschow M, Banerjee R, Hessman F V. *A&A*, 2014, 562: A19
- [97] Dong S, Xie J W, Zhou J L, et al. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2018, 115: 266
- [98] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. *Journal of Astronomical Telescope, Instruments and Systems*, 2015, 1: 014003
- [99] Broeg C, Fortier A, Ehrenreich D, et al. *European Physical Journal Web of Conferences*, 2013, 47: 03005

- [100] Rauer H, Catala C, Aerts C, et al. *Experimental Astronomy*, 2014, 38: 249
[101] Beichman C, Benneke B, Knutson H, et al. *PASP*, 2014, 126: 1134

Research Progress of the Planet Population Synthesis

LI Si-nan^{1,2,3}, JIA Shi^{1,2,3}, YU Cong⁴

(1. *Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China*; 4. *School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China*)

Abstract: Population synthesis, which is an important approach in astrophysics, has been widely used in stellar physics. With the accumulation of observed planets, planet population synthesis (PPS) is becoming crucial with the study of exoplanetary statistical characterization. By using the simplified model of planet formation and evolution, PPS can theoretically obtain the statistical results of planets simulating a large amount of initial conditions (properties of the parent protoplanetary disk) and boundary conditions (stellar cluster environment) simultaneously. The direct comparison of the results from PPS and the observations is of great significance in constraining the theoretical models of planet formation and evolution. We overview the models of planet population synthesis, present its main statistical results (mass-distance distribution, radius-distance distribution, mass function, luminosity distribution, mass-radius relationship) and the latest progress (discussions about atmospheric evaporation effect, pebble accretion, planet occurrence rate and system architecture). We also discuss the future perspectives of planet population synthesis.

Key words: planet population synthesis; planet formation theory; planet evolution theory