

M型恒星周围系外行星统计研究*

潘梦睿^{1,2,3†} 季江徽^{1,2,3‡} 王 素^{1,2,3}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学院行星科学重点实验室 南京 210023)

(3 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 M型恒星(M dwarf)是主序星中质量较小的恒星,也是银河系中数量最多的恒星类型,在其周围形成的行星通常距离主星较近,宜居带也比F、G、K型恒星更靠近主星,更有利于发现系外宜居行星. 研究表明, M型恒星周围平均存在2.5颗小质量行星,约为F、G、K型恒星的3.5倍,但M型恒星周围巨行星的出现率(occurrence rate)则比F、G、K型小一个量级. 基于M型恒星周围发现的401颗行星的参数开展了统计研究,发现质量越大的行星平均轨道半长径越大. 类地行星约占行星总数的74%,且轨道半长径均小于1 au,其中28颗行星具有潜在宜居性. 根据行星质量-半径关系,在质量等于4倍地球质量(M_{\oplus})处存在一拐点,除少数几颗行星外,大部分小于该质量的行星可能都是由约65%的硅酸盐和约35%的铁组成,大于该质量的行星半径则随质量增加而迅速增大. 约60%的M型恒星周围的行星位于多行星系统且轨道分布紧密,相邻行星轨道在3 : 2、5 : 3及2 : 1等平运动共振位置处存在峰值. M型恒星的多行星系统形成与演化等问题对现今的行星形成理论提出了新挑战.

关键词 恒星: 小质量, 恒星: 行星系统, 方法: 统计

中图分类号: P145; 文献标识码: A

1 引言

M型恒星是质量约为0.075–0.6倍太阳质量(M_{\odot}),温度约为3000–4000 K的小质量主序型恒星,约占银河系总质量的40%,是数量最多的恒星类型^[1]. 凌星法和视向速度探测等方法探测M型恒星周围行星的重要手段. 行星宜居性是行星科学领域的前沿课题之一,由于M型恒星有效温度低、宜居带距离主星近,位于宜居带内的行星公转周期短,因此相比F、G、K型恒星更容易探测到其周围的宜居行星. 通过对M型恒星周围行星的探测与样本统计研究,不仅丰富了人们对行星族群的认知,也为深入了解其形成演化提供了新思路.

2020-11-30收到原稿, 2021-01-28收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12033010、11773081),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

†panmr@pmo.ac.cn

‡jjjh@pmo.ac.cn

鉴于M型恒星的亮度低、恒星活动性较强等因素,早期天文学家们仅致力于寻找类太阳恒星周围的系外行星,发现了大量环绕F、G、K型恒星的行星^[2-6],M型恒星周围的行星则相对较少^[7-8].2001年,Marcy等人通过利克(Lick)和凯克(Keck)天文台的视向速度数据,首次发现了围绕M型恒星GJ 876周围的一对处于2:1轨道共振的气态巨行星^[9],引发了对该行星系统形成演化研究的热潮^[10-13].此后,HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher)^[14-16]和加州行星搜寻项目(California Planet Survey)^[17]又陆续发现了新的环绕M型恒星的行星.近年来,随着空间及地面望远镜分辨能力和探测精度的提高,天文学家开展了多项以搜寻M型恒星周围行星为核心科学目标的探测项目,如MEarth (M dwarf search for Earth-like Planets)项目使用8台0.4 m自动化地基望远镜,通过凌星法搜寻太阳系周围33 pc内质量为0.10–0.35 M_{\odot} ,半径小于0.35倍太阳半径(R_{\odot})的中晚期M型恒星周围地球大小的行星^[18-19].西班牙-德国天文中心的CARMENES (Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs)项目,利用西班牙南部的3.5 m望远镜,结合近红外观测与光学阶梯光栅光谱仪搜寻M型恒星周围的类地行星^[20-22].SPIRou (SpectroPolarimetre Infra-Rouge)^[23-24]和宜居带行星搜寻计划(The Habitable Zone Planet Finder, HPF)^[25-26]则均致力于通过视向速度法在近红外波段寻找M型恒星周围的宜居行星.此外,K2 (Kepler's second mission)^[27-29]、TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)^[30-32]及SPECULOOS (Search for habitable Planets EClipsing ULtra-cOOl Stars)^[33]等项目均使用凌星法在M型恒星周围观测到了行星甚至多行星系统.

图1给出了http://exoplanet.eu系外行星网站中目前不同质量恒星周围行星及伴星的观测特征,其中左图为恒星质量(M_*)与行星质量(M_p)分布图,右图为行星轨道半长径-质量分布图^[34].图中蓝色和橘色分别代表质量位于0.075–0.6 M_{\odot} 之间的M型恒星周围小于及大于一个木星质量(M_J)的行星,类似地,紫色和绿色表示F、G、K型恒星周围的行星,黑色为褐矮星周围行星的分布情况.根据现有行星形成理论,通常认为行星形成于恒星周围的原行星盘中.由于小质量恒星周围的原行星盘质量较小,因此在其周围形成巨行星相对困难^[35].

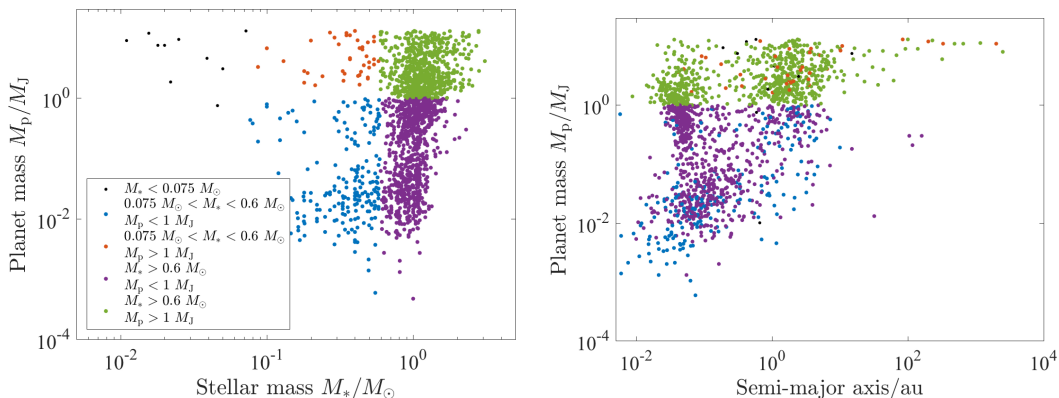


图 1 不同质量恒星周围系外行星特征对比^[34]

Fig. 1 Comparison of the properties of the observed exoplanets around different stellar masses^[34]

而观测结果统计发现, 尽管M型恒星的质量及光度均较小, 但在其周围形成的行星类型依旧具有多样性, 行星质量范围从地球质量到木星质量不等, 轨道半长径分布范围也十分广泛, 为 10^{-3} – 10^4 au, 此外多行星系统内行星的轨道分布也具有多样性, 以上观测事实均对现有行星形成理论提出了新挑战.

本文在第2节统计分析M型恒星周围系外行星的特征分布; 第3节讨论了M型与F、G、K型恒星周围的行星出现率; 第4节简要介绍了系外行星形成研究及模型; 第5节介绍了目前对行星大气及原行星盘的观测; 最后对未来地面及空间望远镜探寻M型恒星周围系外行星进行了总结与展望.

2 M恒星周围行星统计特征

截止2020年11月发现的系外行星已达4360颗, 本文主要根据<http://exoplanet.eu>系外行星网站中的数据库, 并参考了<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>, 基于以下筛选原则给出了401颗环绕M型恒星的系外行星及其质量、轨道半长径、偏心率和恒星金属丰度等参数: (1)主星光谱型已证实属于M型的行星; (2)若恒星光谱型未确定, 则选取质量介于 0.075 – $0.6M_{\odot}$ 、温度介于 3000 – 4000 K之间的恒星及其环绕行星^[36]; (3)行星质量不超过可发生核聚变的临界质量($13M_J$). 在这些行星样本中, 约53.6%的行星通过凌星法发现, 视向速度法发现的行星约占总样本数的25.6%, 还有约13.7%的行星由多个观测方法证实, 其余少数为引力透镜、直接成像法等其他探测方法发现. 通常, 若通过测光或分光观测获得恒星半径, 结合凌星观测即可获得行星的半径和周期参数^[37], 当多行星系统中的行星间扰动使行星中天时刻(Transit Timing)发生变化, 则可对行星质量进一步估算, 但并非所有行星的观测都存在中天时刻变化, 因此本文根据开普勒行星质量-半径经验关系^[38]

$$\begin{aligned}
 R_p/R_{\oplus} < 1.5 : \\
 \rho_p &= 2.43 + 3.39(R_p/R_{\oplus})g \cdot \text{cm}^{-3} \\
 M_p &= (\rho_p/\rho_{\oplus})(R_p/R_{\oplus})^3 M_{\oplus} \\
 1.5 \leq R_p/R_{\oplus} \leq 4.0 : \\
 M_p &= 2.69(R_p/R_{\oplus})^{0.93} M_{\oplus} \\
 4.0 < R_p/R_{\oplus} < 9.0 : \\
 M_p &= 0.86(R_p/R_{\oplus})^{1.89} M_{\oplus},
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中 R_p 和 ρ_p 分别表示行星的半径及密度, R_{\oplus} 、 M_{\oplus} 和 ρ_{\oplus} 分别为地球半径、质量及密度. 本文对样本中约40.1%的行星进行了质量估算, 此外根据开普勒第3定律还估算了约21.1%行星的轨道半长径, 最终对观测及估算所得的全部参数开展了统计分析.

若将行星按质量分类, 则含有2颗亚地球(sub-Earth)行星($< 0.1M_{\oplus}$), 62颗类地行星(0.1 – $2M_{\oplus}$), 242颗超级地球(2 – $10M_{\oplus}$), 43颗类海王星行星(10 – $100M_{\oplus}$)及52颗类木行星($100M_{\oplus}$ – $13M_J$); 按系统内行星个数划分, 有162颗位于单行星系统, 239颗位于88个多行星系统中; 按环绕主星类型分, 包括35颗位于双星及多恒星系统内的行星, 366颗单恒星系统行星. 图2为行星质量、轨道半长径、偏心率及恒星金属丰度的特征概率分布

图. 研究发现, M型恒星周围的行星质量在 $4-7M_{\oplus}$ 间存在峰值, 概率约为35%. 约88%的行星位于距离主星0.01–1 au处, 其中~92%的类地行星与主星距离介于0.01–0.3 au之间, ~80%的类海王星位于主星0.03–1 au处, ~82%的巨行星距离主星0.01–10 au, 可见大质量行星比小质量行星更容易在主星外侧形成. 理论上, 原行星盘外侧的固体颗粒和气体通常由于温度较低而发生凝结形成较大团块, 位于外侧的行星胚胎吸积后因此形成大质量行星, 此外行星在原行星盘中将产生螺旋密度波并在力矩的作用下产生迁移, 类地行星I类迁移的速度通常远大于巨行星的II类迁移^[39], 因此更容易迁移到靠近主星的位置, 使小质量行星的轨道半长径普遍小于大质量行星. 此外, 小质量行星的偏心率也略小于大质量行星, 如类地行星偏心率在~0.1处的概率最大, 为0.14, 而亚海王星和巨行星的偏心率峰值则位于~0.2处, 概率约为0.2, 这可能与巨行星在形成过程中发生的碰撞与散射次数更多有关. 恒星金属丰度分析发现, 大质量行星更倾向于在高金属丰度的恒星周围形成, 反之则更容易生成小质量行星.

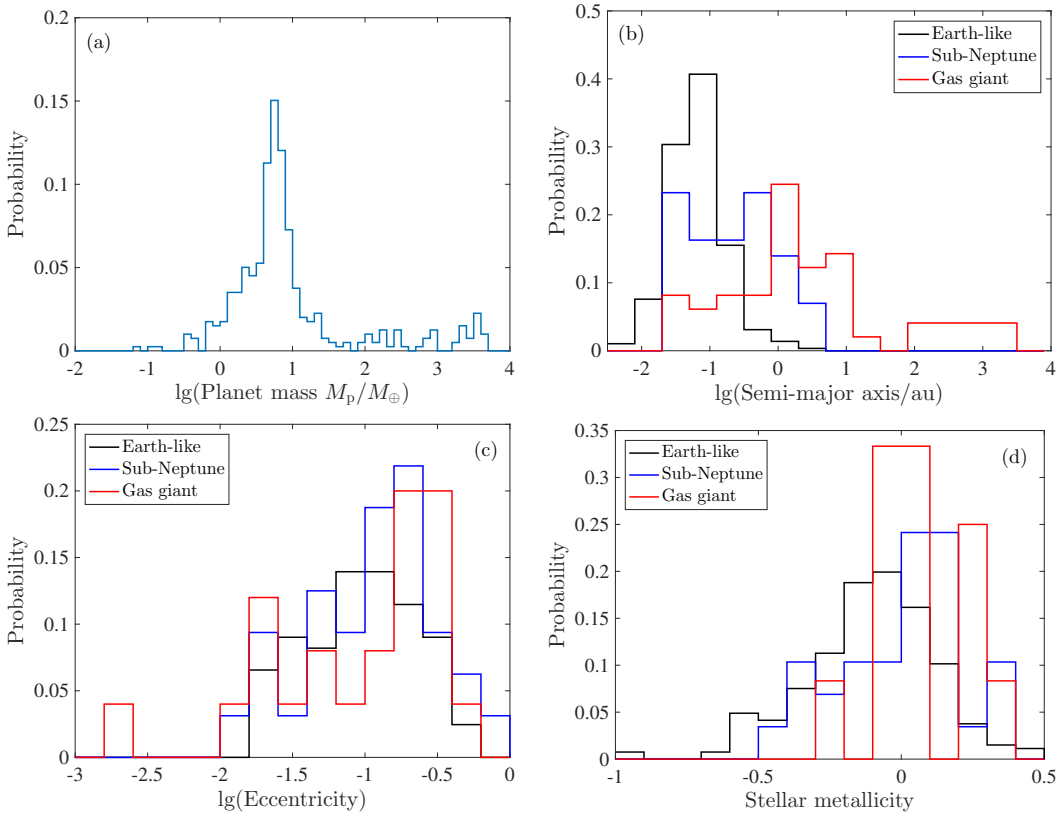


图 2 M型恒星周围行星质量(a)、轨道半长径(b)、偏心率(c)及恒星金属丰度关系(d)的特征对比图. 图(b)–(d)中黑色、蓝色及红色线分别代表类地行星、亚海王星及气态巨行星的特征概率.

Fig. 2 Comparison between the mass (a), semi-major axis (b), eccentricity (c) and stellar metallicity (d) of different exoplanets around M dwarfs. Black, blue and red lines in panels (b)–(d) present Earth-like planets, sub-Neptune and giant planets, respectively.

2.1 行星质量-半径关系

行星形成的初始条件及演化过程通常决定了该行星最终的组成成分及物理特性, 如行星大气包层受到恒星辐射而逃逸蒸发, 使得半径约 $2R_{\oplus}$ 的行星在统计上存在缺失^[40-41], 反之分析行星的组成物质也有助于反演该行星的形成及演化过程. 根据行星质量-半径与行星内部水冰及岩石等成分含量的分析关系函数^[42]

$$\begin{cases} R_p/R_{\oplus} = (0.0912\text{imf} + 0.1603)[\lg(M_p/M_{\oplus})]^2 + \\ \quad (0.3330\text{imf} + 0.7387)\lg(M_p/M_{\oplus}) + (0.4639\text{imf} + 1.1193), \\ R_p/R_{\oplus} = (0.0592\text{rmf} + 0.0975)[\lg(M_p/M_{\oplus})]^2 + \\ \quad (0.2337\text{rmf} + 0.4938)\lg(M_p/M_{\oplus}) + (0.3102\text{rmf} + 0.7932), \end{cases} \quad (2)$$

其中imf和rmf分别为行星结构中水冰和岩石的质量比, imf为1时表示水冰含量为100%, imf = 0或rmf = 1表示行星全部由岩石组成, rmf为0时表示行星完全由铁组成, 图3展示了M型恒星周围行星的质量-半径关系及其成分分析, 其中三角形表示直接由观测得到的行星数据, 实心圆为质量-半径经验公式推算出的行星数据, 蓝色、黄色及绿色曲线分别表示冰、硅酸盐及铁的密度曲线. 通常认为位于水冰密度曲线上方的行星存在一个由氢和氦组成的气体包层, 而在曲线下方的高密度行星则可能是巨行星大气损失殆尽后剩余的行星核^[43].

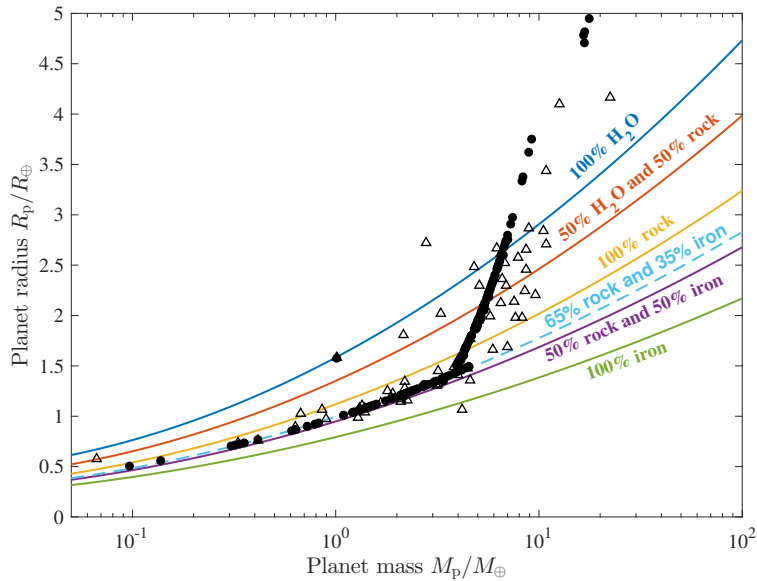


图3 M型恒星周围行星的质量-半径关系图. 图中彩色实线自上而下分别是100%冰、50%的冰和50%的岩石、100%岩石、50%的岩石和50%的铁以及100%铁的密度曲线, 虚线为65%的岩石和35%的铁的密度曲线, 三角形和实心圆分别代表观测数据和质量-半径经验公式推算出的实验数据.

Fig. 3 Mass-radius diagram of planets around M dwarfs. The color solid curves in the figure from top to bottom present the density of 100% ice, 50% ice and 50% rock, 100% rock, 50% rock and 50% iron, 100% iron, respectively. The dashed line shows the density curve of 65% rock and 35% iron. The triangle and filled circles represent the observational data and the experimental data calculated from the empirical mass-radius equation, respectively.

由图3可见,小质量行星和大质量行星的质量-半径关系在 $\sim 4M_{\oplus}$ 处存在拐点.除少数几颗行星外,小于该质量的大部分行星内部可能存在由铁等重金属元素构成的地核以及硅酸盐表层,地核与岩石层的质量占比分别约35%和65%,大于 $4M_{\oplus}$ 的行星半径则随质量增加而迅速增大.造成该现象的原因有两方面:一方面尽管小质量行星自身的半径和表面积较小,大气逃逸的总量相对也较少^[44],但是由于距离主星较近、引力势较小,主星的辐射、星风等依然可以有效剥离它们的外壳而仅残留一小部分的稀薄大气和致密行星核;另一方面小质量行星本身无法吸积大量气体,而大质量行星由于引力较大通常可束缚大量气体而形成浓密且厚重的大气包层.少部分位于雪线外的行星在形成过程中吸积大量水冰也可能导致密度较低的大质量行星的形成.

2.2 多行星系统

据统计,在88个环M型恒星多行星系统中有49个系统内含有两颗行星,25个存在3颗行星,12个系统包含4颗及以上的行星,其中9个多行星系统存在巨行星,17个多行星系统中存在亚海王星大小的行星,63个多行星系统中目前仅发现了类地行星.由类地行星组成的系统均分布在距离主星1 au以内,轨道结构较为紧密,尽管可能受到恒星潮汐作用力的影响但依旧可长期处于动力学稳定状态^[45-46].

行星在形成过程中通常会与原行星盘进行角动量交换而迁移,并形成具有共振结构的多行星系统^[47],如GJ 876周围的行星b和c位于2:1平运动共振^[12],行星TOI-270 c/b、d/c周期比分别为5:3和2:1^[48],TRAPPIST-1系统内的7颗行星均近似处在共振链上^[49].但行星形成后期若受到恒星电磁辐射、行星间碰撞以及潮汐等作用的影响,部分行星也有可能脱离平运动共振^[50].图4展示了行星系统中相邻行星周期比的概率分布图,由图可见,行星轨道周期比值在3:2、5:3和2:1等低阶平运动共振附近存在峰值,概率分别约为10.5%、9.2%和5.6%,此外部分类地行星还近似处在8:5和5:2甚至更高阶共振附近.研究表明,在这些高阶共振结构及结构紧密的行星系统外侧很可能存在一颗或多颗尚未被观测到的具有一定偏心率的巨行星^[51-56].

2.3 行星宜居性

M型恒星由于温度较低,位于宜居带内的行星距离主星较近便于观测等特点,现已成为寻找系外宜居行星的主要目标.然而对于M型恒星周围行星的宜居性此前曾存在一些争议,Selsis等^[57]提出M型恒星的活动性较强,在恒星辐射的长期作用下行星存在大气的可能性极低,同时这些近距离行星可能被恒星潮汐锁定(tidal locking),因此宜居带内的行星可能由于背阳面(night side)温度过低或不存在大气而不具备宜居性.但多项研究表明,在具有浓密大气及大气环流的情况下,行星背阳面的大气可能会被加热至二氧化碳的凝点^[58-59],观测也证实距离主星较近的行星也可能存在大气^[60].

通常认为宜居行星是动力学稳定的岩石类行星,其表面需存在生命必需的稳定的液态水和大气,在此基础上提出了宜居带的概念^[57, 61].一般定义方式有两种,一种取内外边界分别为行星平流层内水蒸气达到饱和的临界位置和 CO_2 气体达到最大温室效应的保守宜居带(conservative habitable zone),另一种则为参考太阳系得到的经验宜居带(empirical habitable zone),分别以现在的金星轨道和火星早期轨道为内外边界^[62].目前已发现了一些位于宜居带内的行星,如TRAPPIST-1行星系统内的e、f、g行星^[63],

GJ 667 C系统内的c、f、e行星^[64], GJ 163的c行星^[65]等. 参考经验宜居带的定义^[62]

$$\begin{cases} S_{\text{eff}} = S_{\text{eff}\odot} + aT_* + bT_*^2 + cT_*^3 + dT_*^4, \\ D = \left(\frac{L_*/L_\odot}{S_{\text{eff}}}\right)^{0.5} \text{ au}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 S_{eff} 、 T_* 和 L_* 分别为恒星辐射、有效温度和光度, $S_{\text{eff}\odot}$ 和 L_\odot 分别为太阳系恒星辐射值和光度, $T_* = T_{\text{eff}} - 5780\text{K}$, 系数 a 、 b 、 c 、 d 为常数, D 为宜居区位置与恒星间的距离, 本文计算了M型恒星周围宜居带的范围, 并筛选了位于宜居带内小质量行星. 图5为潜在宜居行星分布图, 其中橘黄色矩形区域为各行星系统的经验宜居带范围, 黑色、蓝色及红色圆点分别代表类地行星、类海王星及类木行星, 矩形区域颜色及圆点大小分别代表不同的恒星及行星质量, 宜居行星的具体参数见表1. 由图可见, 目前观测到的大部分含有宜居行星的均为多行星系统, 多数系统内仅有一颗行星位于宜居带内.

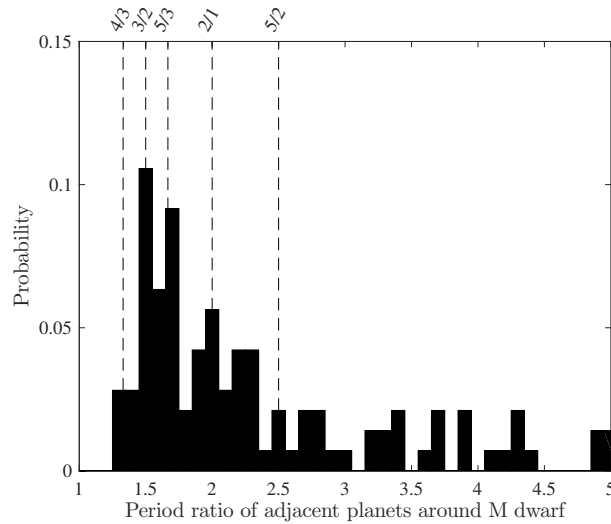


图4 M型恒星多行星系统中相邻行星周期比分布图

Fig. 4 Distribution of period ratios of adjacent planets in multi-planetary systems around M dwarfs

3 M型恒星周围的行星出现率

M型恒星周围的行星虽然与F、G、K型同样具有多样性, 但由于主星存在质量、温度、金属丰度等方面的差异, 小质量行星与巨行星的出现率也存在很大的差异. 通常恒星质量越大金属丰度越高, 其周围原行星盘中的尘埃气体及重金属含量也越高, 更有利于巨行星的形成, 反之则更易形成小质量岩石行星^[66].

3.1 小质量行星出现率

自开普勒(Kepler)空间望远镜搜寻任务开展以来, M型恒星周围发现了大量小质量行星($R_p \leq 4R_\oplus$), 这些行星通常距离主星较近, 轨道周期较短, 因此更有利于通过凌星法观测发现. 为了分析M型恒星周围出现小质量行星的机率, 2013年Dressing和Charbonneau^[67]首次分析了Kepler Q1-Q6数据中温度小于4000 K的恒星周围周期小于

50 d 的行星出现率, 发现半径位于 $0.5\text{--}4R_{\oplus}$ 区间内的行星出现率为 $0.90^{+0.04}_{-0.03}$. 2015 年, Dressing 和 Charbonneau^[68] 使用 Kepler Q0–Q17 全部数据并使用恒星光谱和测光观测结果优化了恒星样本的选取, 发现每一颗 M 型恒星周围都有 2.5 ± 0.2 颗半径 $1\text{--}4R_{\oplus}$ 的行星在周期小于 200 d 的轨道上绕行. 此后 Gaidos 等^[69] 对 Kepler DR24 数据利用迭代蒙特卡洛模拟法也得出了类似结论, 即 M 型恒星周围轨道周期为 1.5–180 d, 半径为 $1\text{--}4R_{\oplus}$ 的行星出现率为 2.2 ± 0.3 . 而 Hsu 等^[70] 结合 Kepler DR25 与 Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) DR2、2MASS (the Two Micron All-Sky Survey) 数据, 重新筛选了 1746 颗 Kepler 发现的 M 型恒星及 89 颗候选行星, 使用近似贝叶斯计算方法估算发现行星出现率与选择的先验分布有关, 如使用狄利克雷和均匀先验分布计算周期 0.5–256 d, 半径为 $0.4\text{--}4R_{\oplus}$ 的行星出现率分别为 $4.3^{+0.6}_{-0.6}$ 和 $8.4^{+1.2}_{-1.1}$, 两者相差一倍左右.

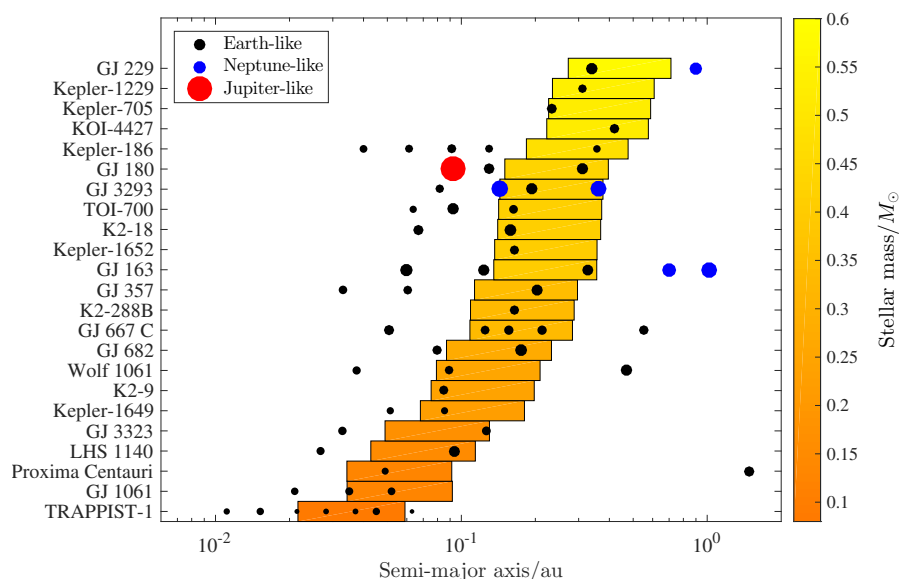


图 5 M 型恒星周围潜在宜居行星分布. 图中黑点、蓝点及红点分别代表类地行星、类海王星及类木星行星, 彩色区域为各系统经验宜居带的位置.

Fig. 5 Distribution of potential habitable planets around M dwarfs. The black, blue and red dots in figure present Earth-like, Neptune-like and Jupiter-like planets, respectively. The colored areas show the habitable zone in each planetary system.

若将小质量行星分类, 则发现不同半径和轨道周期的行星出现率也不同. 根据 Kepler Q1–Q6 数据统计, 周期小于 50 d 的行星中, 半径为 $0.5\text{--}1.4R_{\oplus}$ 的行星出现率 ($0.51^{+0.06}_{-0.05}$) 比半径为 $1.4\text{--}4R_{\oplus}$ 的行星 ($0.39^{+0.05}_{-0.04}$) 高^[67]. Kepler Q0–Q17 数据分析也表明类地行星 ($1\text{--}1.5R_{\oplus}$) 的出现率 ($0.56^{+0.06}_{-0.05}$) 略高于超级地球 ($1.5\text{--}2R_{\oplus}$) 的出现率 ($0.46^{+0.07}_{-0.05}$)^[68], 行星出现率在半径 $\sim 1.2R_{\oplus}$ 处达到最大值^[69]. HARPS 观测结果表明, 小质量行星位于周期 10–100 d 的轨道上的概率比 1–10 d 的概率高, 分别为 $0.52^{+0.50}_{-0.16}$ 和 $0.36^{+0.25}_{-0.10}$ ^[16].

表 1 M型恒星周围具有潜在宜居性的行星的参数
Table 1 The parameters of potential habitable planets around M dwarfs

Planet	M_p/M_\oplus	R_p/R_\oplus	Orbital period/d	Semi-major axis/au	Eccentricity	Inclination/ $^\circ$
GJ 1061 c	1.74	–	6.69	0.04	0.29	–
GJ 1061 d	1.57	–	12.43	0.05	0.54	–
GJ 163 c	7.60	–	25.64	0.12	0.03	–
GJ 180 d	7.50	–	106.34	0.31	0.16	–
GJ 229 A c	7.93	–	122.01	0.34	0.29	–
GJ 3293 d	7.63	–	48.135	0.19	0.12	–
GJ 3323 c	2.31	–	40.54	0.13	0.17	–
GJ 357 d	7.22	–	55.70	0.20	0.03	–
GJ 667 C c	3.82	–	28.14	0.13	0.02	–
GJ 667 C e	2.70	–	62.24	0.21	0.02	–
GJ 667 C f	2.70	–	39.03	0.16	0.03	–
GJ 682 c	8.70	–	57.32	0.18	0.10	–
K2-18 b	8.63	2.71	32.94	0.16	0.20	89.58
K2-288B b	–	1.70	31.39	0.16	–	89.81
K2-9 b	–	1.60	18.45	0.08	–	–
Kepler-1229 b	–	1.40	86.83	0.31	–	–
Kepler-1649 c	–	1.06	19.50	0.09	–	–
Kepler-1652 b	–	1.60	38.10	0.17	–	89.99
Kepler-186 f	–	1.11	129.95	0.36	–	–
Kepler-705 b	–	2.11	56.06	0.23	–	–
KOI-4427.01	–	1.84	147.66	0.42	0.02	89.97
LHS 1140 b	6.89	1.73	24.74	0.09	0.06	89.91
Proxima Centauri b	1.17	–	11.22	0.05	0.10	–
TOI-700 d	2.26	1.19	37.43	0.16	0.03	89.73
TRAPPIST-1 e	0.60	0.92	6.10	0.03	0.00	89.86
TRAPPIST-1 f	0.67	1.05	9.21	0.04	0.00	89.68
TRAPPIST-1 g	1.34	1.13	12.35	0.05	0.00	89.71
Wolf 1061 c	3.40	–	17.87	0.09	0.11	–

Note: The parameters are adopted from <http://exoplanet.eu>.

3.2 巨行星出现率

理论研究表明,小质量恒星周围通常由于原行星盘中气体及固体颗粒含量相对较少而很难形成大质量行星^[35]. Butler等^[7]最先提出质量大于 $1 M_J$ 、周期小于3 yr的巨行星出现率约为0.5%. 随后Endl等^[71]利用Hobby-Eberly望远镜、McDonald天文台的Harlan J Smith 2.7 m望远镜、欧南台(European Southern Observatory)的VLT (Very Large Telescope)和Keck I望远镜的视向速度观测结果,得出M型恒星周围1 au以内出现巨行星的概率小于1.27%,在更大轨道半径范围内(小于2.5 au)的行星出现率也仅 $3.4^{+2.2}_{-0.9}\%$ ^[66]. 近年HARPS高精度视向速度观测数据也显示, M型恒星周围存在大于土星质量且轨道周期在1–10 d范围内的行星概率不到1%,轨道周期为10–100 d的巨行星概率约 $2^{+3}_{-1}\%$ ^[16]. 若结合视向速度观测与自适应光学成像结果,则距离主星20 au以内存在质量大于 $1 M_J$ 行星的概率约为 $6.5\% \pm 3.0\%$ ^[72],与引力透镜观测结论得出的结论一致^[73]. 但若将微引力透镜与视向速度结果结合,则M型恒星周围存在 $M_p \sin i > 0.1 M_J$ (其中*i*为行星轨道倾角)、周期小于27 yr行星的概率将增加至 $15\% \pm 6\%$,比之前得出的结论高了一个量级左右^[74]. 可见巨行星发生率与观测手段息息相关,对多项观测数据的统计分析有利于更全面地了解M型恒星周围巨行星的发生率.

3.3 宜居行星出现率

自系外行星发现以来,太阳系外是否存在适宜生命生存的行星便成为行星科学领域的一项重要课题. 2013年, HARPS数据分析显示M型恒星周围宜居行星($1 \leq M_p \sin i \leq 10 M_\oplus$)的出现率约为 $0.41^{+0.54}_{-0.13}\%$ ^[16],而Kepler Q1–Q6数据发现半径 $0.5\text{--}1.4 R_\oplus$ 的宜居行星的平均概率仅 $0.15^{+0.13}_{-0.06}\%$ ^[67],两者结论相差甚远. 随后不久, Kopparapu等^[62]根据保守宜居带及经验宜居带的定义分别重新估算了Kepler数据中行星在不同宜居带内的出现率. 研究发现,保守宜居带和经验宜居带内存在半径为 $0.5\text{--}1.4 R_\oplus$ 宜居行星的概率分别为 $0.48^{+0.12}_{-0.24}\%$ 和 $0.53^{+0.08}_{-0.17}\%$ ^[75],与Bonfils等^[16]之前得到的结果接近. 若将行星半径扩大至 $0.5\text{--}2 R_\oplus$,则保守和经验宜居带内的行星出现率则分别增至 $0.51^{+0.10}_{-0.20}\%$ 和 $0.61^{+0.07}_{-0.15}\%$. 2015年, Kepler Q0–Q17数据分析显示,保守和经验宜居范围内类地行星($1\text{--}1.5 R_\oplus$)出现率分别为 $0.16^{+0.17}_{-0.07}\%$ 和 $0.24^{+0.18}_{-0.08}\%$,超级地球($1.5\text{--}2.0 R_\oplus$)分别为 $0.12^{+0.10}_{-0.05}\%$ 和 $0.21^{+0.11}_{-0.06}\%$ ^[68]. 表2列出了近年M型恒星周围宜居行星出现率的估算结果,其出现率约为0.2–0.5.

3.4 行星出现率与恒星类型

行星出现率除与行星质量、半径及公转周期等自身特性有关外,还与主星质量、金属丰度及光谱型相关. 研究发现,巨行星出现率(*f*)与恒星质量及金属丰度([Fe/H])的关系可近似表示为 $f = C M_*^x 10^{y[\text{Fe}/\text{H}]}$,其中*C*、*x*、*y*均为常数. Johnson等^[66]对加州行星搜寻项目中1266颗质量为 $0.2\text{--}1.9 M_\odot$ 的恒星及其周围2.5 au以内的行星模拟给出,*x*和*y*值分别为 1.0 ± 0.3 和 1.2 ± 0.2 . 其中M型恒星周围巨行星的出现率对恒星金属丰度的依赖性相对比F、G、K型小,关系常数 $y = 1.06 \pm 0.42$,常数*C*的最佳拟合值为 0.025 ^[77]. 而Neves等^[78]和Montet等^[72]分别对M型恒星周围更大范围(< 20 au)内巨行星的生成率研究,得出*y*的值是之前的2–3倍,分别为 2.94 ± 1.03 和 3.8 ± 1.2 ,高金属和低金属丰度的M型恒星周围巨行星的出现率分别为 $12.4\% \pm 5.4\%$ 和 $0.96\% \pm 0.51\%$.

与F、G、K型恒星相比, M型恒星周围出现周期小于200 d的小质量行星的概率约为F、G、K型的3.5倍^[79-81], 而巨行星的出现率则仅为F、G、K型的一半^[82-83], 其中周期小于3 yr的巨行星出现率比F、G、K型小一个量级^[84]. 但若按照等效恒星辐射计算, 不同恒星类型周围行星的出现率相差不大^[70]. 此外, 随着恒星及行星的形成演化, 光谱型晚期的恒星周围出现行星的概率比光谱型早期的恒星高. 在M型早期恒星周围, 半径 $0.5-2.5R_{\oplus}$ 、周期0.5-10 d的行星出现率为 $0.63_{-0.06}^{+0.08}$ ^[68], 而至中期(M3V-M5V)时出现率增长至早期的两倍($1.19_{-0.49}^{+0.70}$), 其中M3V、M4V和M5V型恒星周围行星出现率分别为 $0.86_{-0.68}^{+1.32}$ 、 $1.36_{-1.02}^{+2.3}$ 和 $3.07_{-2.49}^{+5.49}$ ^[85].

表 2 M型恒星周围宜居行星出现率
Table 2 The occurrence rate of habitable planets orbiting M dwarfs

Occurrence rate	Condition	Reference	Note
$0.41_{-0.13}^{+0.54}$	$1-10M_{\oplus}$	Bonfils et al. (2013) ^[16]	Habitable zone (HZ): Selsis et al. (2007) ^[57]
$0.15_{-0.06}^{+0.13}$	$0.5R_{\oplus} \leq R_p \leq 1.4R_{\oplus}$	Dressing & Charbonneau (2013) ^[67]	Host stars: $T_* \leq 4000$ K HZ: Kasting et al. (1993) ^[61]
$0.48_{-0.24}^{+0.12}$ (conservative HZ) $0.53_{-0.17}^{+0.08}$ (optimistic HZ)	$0.5R_{\oplus} \leq R_p \leq 1.4R_{\oplus}$	Kopparapu et al. (2013) ^[62]	HZ: Kopparapu et al. (2013) ^[62]
$0.51_{-0.20}^{+0.10}$ (conservative HZ) $0.61_{-0.15}^{+0.07}$ (optimistic HZ)	$0.5R_{\oplus} \leq R_p \leq 2R_{\oplus}$	Kopparapu et al. (2013) ^[62]	HZ: Kopparapu et al. (2013) ^[62]
$0.21_{-0.05}^{+0.03}$	$3M_{\oplus} \leq M_p \sin i \leq 10M_{\oplus}$	Tuomi et al. (2014) ^[76]	HZ: Kopparapu et al. (2013) ^[62]
$0.16_{-0.07}^{+0.17}$ (conservative HZ) $0.24_{-0.08}^{+0.18}$ (optimistic HZ)	$1R_{\oplus} \leq R_p \leq 1.5R_{\oplus}$	Dressing & Charbonneau (2015) ^[68]	HZ: Kopparapu et al. (2013) ^[62]
$0.12_{-0.05}^{+0.10}$ (conservative HZ) $0.21_{-0.06}^{+0.11}$ (optimistic HZ)	$1.5R_{\oplus} \leq R_p \leq 2R_{\oplus}$	Dressing & Charbonneau (2015) ^[68]	HZ: Kopparapu et al. (2013) ^[62]
$0.15_{-0.05}^{+0.10}$	$2R_{\oplus} \leq R_p \leq 4R_{\oplus}$	Dressing & Charbonneau (2015) ^[68]	HZ: conservative HZ Kopparapu et al. (2013) ^[62]
$0.33_{-0.12}^{+0.10}$	$0.75R_{\oplus} \leq R_p \leq 1.5R_{\oplus}$	Hsu et al. (2020) ^[70]	HZ: conservative HZ Kopparapu et al. (2013) ^[62]

4 M型恒星周围行星形成理论及研究现状

与F、G、K型恒星类似,目前通常使用核吸积或引力不稳定模型解释M型恒星周围行星的形成,其中核吸积理论可以很好地解释类地行星及类海王星的形成,却很难解释小质量恒星周围形成的类木行星^[86-87],因此一些天文学家致力于寻找原行星盘发生不稳定性的必要条件,试图通过引力不稳定模型解释M型恒星周围巨行星的形成。

4.1 核吸积模型

在核吸积模型中,亚微米级大小的尘埃受重力作用向中心平面掉落,并在气体动力学拖拽下凝结逐渐形成毫米级大小的卵石及米级大小的岩石,当原行星盘中逐渐形成千米级大小的星子后将进入雪崩生长期(runaway growth)及寡头生长期(oligarchic growth)形成原行星,最终吸积气体逐渐演化成类地行星或巨行星^[88]。

与大质量恒星不同的是,小质量恒星周围的原行星盘吸积率较小且随时间下降更快^[89]。质量为 $0.1M_{\odot}$ 的M型恒星周围气体盘初始吸积率($\dot{M}_g \simeq 5 \times 10^{-9} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$)约为类太阳恒星的1/5,2 Myr后则仅为类太阳恒星的1/40^[90]。对吸积率积分发现,原行星盘早期($t \lesssim 1 \text{ Myr}$)质量近似与主星质量成正比,而当 $t \sim 1-3 \text{ Myr}$ 时,由于小质量恒星周围的原行星盘演化较快,盘质量逐渐近似与主星质量的平方成正比($M_d \propto M_*^2$)^[91]。随着恒星年龄的增长,恒星光度与恒星质量的指数关系也逐渐增大^[92-93],当恒星年龄小于10 Myr时,其光度近似正比于恒星质量的1-2次方($L_* \propto M_*^{1-2}$),而10 Myr后则与 M_*^{3-4} 成正比。以上因素均会影响原行星盘的结构及雪线位置,并决定星子和行星胚胎等在原行星盘中的分布。此外,小质量恒星周围原行星盘内的斯托克斯数(Stokes number)增长速率比大质量恒星快,使得行星吸积效率随时间逐渐减小,阻碍了大质量行星的形成^[90]。

Ida和Lin^[87]最早通过核吸积模型模拟了M型恒星周围短周期行星的形成,发现行星在快速吸积气体之前便开始迁移,因此形成短周期海王星质量的冰巨星相对较多,而类木行星则相对较少,该结论随后被视向速度观测证实^[8, 66]。Raymond等^[94]通过模拟小质量恒星周围类地行星的形成,发现M型恒星周围宜居带内的行星很可能由于无法有效进行水运输而十分干燥因此不宜居。以上结论均为星子吸积(planetesimal accretion)模型得出,而研究发现行星形成的最终质量与吸积粒子的大小有关^[95],由于较小的粒子与盘中气体的耦合作用较强,当行星掠过其轨道时吸积效率更高。考虑到粒子的气体阻尼(gas drag)时标应与被行星散射的时标一致,行星吸积的特征粒子大小应为毫米至厘米量级,即为“卵石吸积”(pebble accretion)^[96-97]。基于这一理论,Ormel等^[98]提出了行星胚胎起源于雪线处的行星形成机制,解释了TRAPPIST-1及其他M型恒星周围结构紧密的多行星系统的形成过程,图6为以TRAPPIST-1行星系统为例的行星形成与演化过程图。该模型假设在原行星盘的雪线位置(r_{ice})固体颗粒与气体的质量比较高,由于触发流体不稳定而形成星子,星子通过卵石吸积过程逐渐形成原行星胚胎,当胚胎生长至足够大则将开始I类迁移进入雪线内侧,与此同时吸积较为干燥的卵石直到达到孤立质量(isolation mass)。此后,第2颗行星胚胎在雪线处经历类似过程并向内迁移,当迁移至原行星盘内边界(r_c)时停止并与邻近行星进入共振状态。此模型形成的行星通常含有~10%的水^[99],与观测吻合较好^[100-101]。但该理论也存在一些不足,如该模型中的行星

形成于富含气体的原行星盘中, 通常可吸积原始H/He大气, 而目前并没有相应的观测证实^[102]; 雪线处实现卵石堆积的条件较为苛刻, 即需原行星盘足够光滑; 发生流体不稳定的条件目前尚不明确等. 此后, Liu等^[90, 103]模拟了不同质量恒星周围通过卵石吸积形成的行星特征, 发现行星质量随着主星质量和轨道半径增加而增加, 越古老的恒星周围形成的行星质量越小. 质量小于 $0.3M_{\odot}$ 的主星周围很难形成气态巨行星, 在质量为 $0.1M_{\odot}$ 的晚期M型恒星周围最大可形成地球质量的行星.

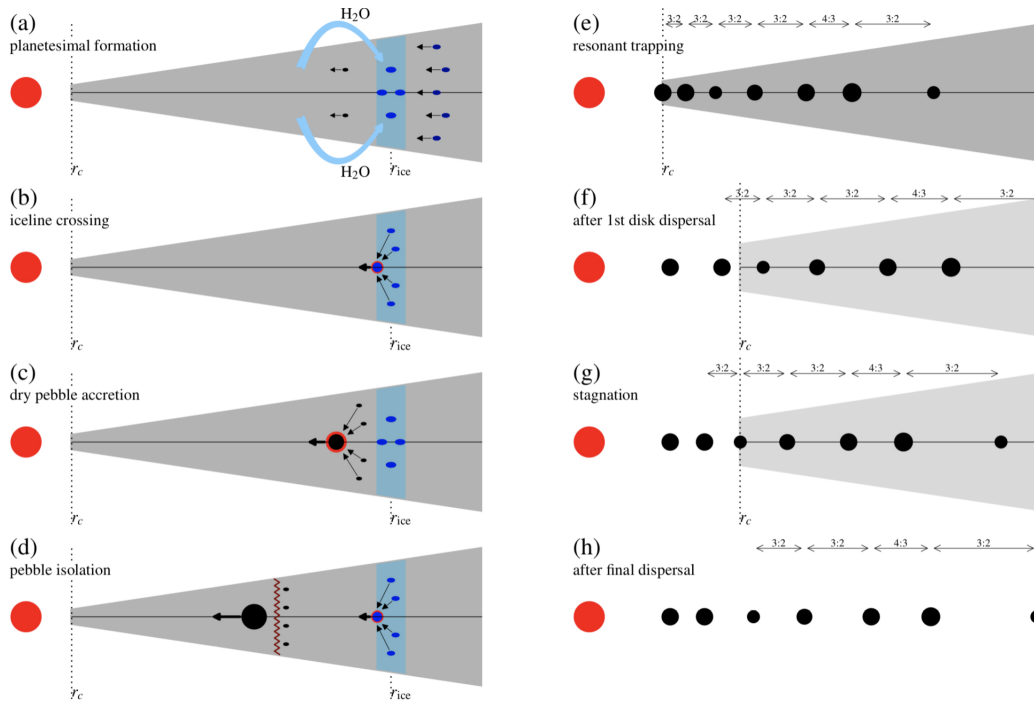


图6 TRAPPIST-1行星系统形成演化图^[98]

Fig. 6 Stages in the formation of the TRAPPIST-1 planetary systems^[98]

4.2 引力不稳定模型

在引力不稳定模型中, 大质量原行星盘由于引力不稳定形成螺旋密度波^[104], 剩余角动量沿径向向外传播耗散, 并加热原行星盘^[105]. 当冷却速度小于0.5-2倍轨道周期且自引力不足以抵抗热压力时^[106-109], 原行星盘将发生坍缩并在短时间内(\sim 数千年)形成具有几个木星质量的原行星^[110-111].

M型恒星周围观测到的巨行星按轨道半径可分为两类: 一类距离主星较近($\lesssim 15$ au), 另一类则与主星距离大于100 au. Boss^[112]对小质量恒星及其周围原行星盘演化模拟发现, 第1类气态巨行星可通过引力不稳定模型在质量为 $0.021-0.065M_{\odot}$ 、4-20 au大小的原行星盘中形成. 而对于轨道半径大于35 au的巨行星, Dodson-Robinson等^[113]对比了核吸积、行星间散射、引力不稳定3种可能的形成机制, 发现只有引力不稳定模型可以解释此类行星的形成. 研究表明, 引力不稳定的触发条件与原行星盘质量有关, 最小原行星盘质量随主星质量和盘尺寸的增加而增加, 对于较小尺寸

的盘, 盘-主星质量比至少需满足 $q \sim 0.3$ 才会发生盘碎裂, 而大尺寸原行星盘则需达到 $q \sim 0.6$ ^[34]. 此外, 引力不稳定模型对金属丰度的依赖性不高, 但当金属丰度足够高(如 $[\text{Fe}/\text{H}] = 10$)时, 原行星盘将由于无法快速冷却而延展并保持引力稳定. 引力不稳定模型通常可解释M型恒星周围10–100 au以内、质量约2–5 M_{J} 的巨行星, 该模型中巨行星的最佳形成位置位于50–60 au处.

5 M型恒星周围原行星盘及行星大气观测现状

尽管目前对行星形成过程的解释尚未统一, 但普遍认为行星形成于原行星盘中并最终形成岩石类行星或气态巨行星, 因此对原行星盘结构及行星大气成分的观测有利于对行星形成过程的研究.

5.1 原行星盘

初期恒星体(Young Stellar Objects)是恒星成为主序星前的演化阶段, 根据红外波段的能谱分布(Spectral Energy Distribution)斜率 α_{IR} 可划分为4个阶段, 其中Class 0的峰值位于远红外或毫米波段, 近红外波段无辐射流量; Class I的能谱在近红外和中红外波段近似平坦或呈现上升趋势, 能谱斜率 $\alpha_{\text{IR}} \geq 0.3$; Class II为经典金牛T型星(Classical T Tauri Star), 其能谱在近红外和中红外波段较为陡峭, 斜率 $-1.6 \leq \alpha_{\text{IR}} < -0.3$; Class III为主序前星(Pre-Main Sequence Star), 近红外能谱特征与原恒星一致, 斜率 $\alpha_{\text{IR}} < -1.6$ ^[114–116]. 通常认为行星形成于Class II和Class III的初期恒星体之间, 此时恒星周围环绕着由气体和尘埃组成的气体盘, 即为原行星盘. 因此行星的形成与演化离不开对原行星盘的研究, 尤其是处于过渡阶段(Class II)的原行星盘的部分观测特征可能直接与行星形成相关^[117–123].

毫米/亚毫米波观测结果表明, 原行星盘的质量约占主星质量的0.2%–0.6%, 其中气体盘与尘埃盘质量比约为100 : 1^[124]. 在金牛座恒星形成区, 尘埃盘与恒星质量的拟合关系可近似表示为 $\lg[M_{\text{dust}}/M_{\oplus}] = (0.94 \pm 0.14) \lg[M_{*}/M_{\odot}] + (1.15 \pm 0.09)$ ^[125]. 尘埃盘质量随时间逐渐衰减, 早期质量最大为0.43–0.59 M_{\odot} , 到晚期仅剩余0.08–0.245 M_{\odot} . 盘标高通常在5–25之间, 内边界位于0.01–1 au. 相比之下, 上天蝎座(Upper Scorpius)的尘埃盘质量则相对较低, 质量关系近似为 $\lg[M_{\text{dust}}/M_{\oplus}] = (0.92 \pm 0.18) \lg[M_{*}/M_{\odot}] + (0.46 \pm 0.09)$ ^[126–127], 可见不同恒星形成区内原行星盘的质量分布也不同.

当原行星盘演化至晚期, 气体盘逐渐耗散, 未被行星吸积的残留小天体将在主序星周围形成碎片盘^[128–130]. Liu等^[131]通过夏威夷-莫纳亚克天文台的麦克斯韦望远镜(JCMT), 在850 μm 和450 μm 波段分别对M型恒星GJ 182及GJ 803的碎片盘进行了观测, 其中GJ 182的碎片盘位于1–2 au处, 质量约为0.007–0.028 M_{\oplus} , 而GJ 803碎片盘距离主星约17 au, 质量约0.011 M_{\oplus} . Lestrade等^[132–134]通过JCMT和IRAM (Institut de Radioastronomie Millimétrique) 30 m望远镜在M3型恒星GJ 842.2和GJ 581周围也发现了碎片盘. 据统计, 年轻M型恒星(≤ 40 Myr)周围碎片盘出现率约6%^[135], 而年老M型恒星周围碎片盘的出现率则不到1.3%^[136–137].

原行星盘尺寸、质量及内部结构的观测为系外行星形成理论研究提供了良好的前提条件. 原行星盘结构决定了行星吸积过程及迁移停止条件, 不同的盘模型还决定了行

星与行星间的轨道特性, 而原行星盘的质量及尺寸则在很大程度上影响着形成行星最终的大小等特征.

5.2 行星大气观测

行星大气是行星形成过程中吸积原行星盘中的气体而逐渐形成的气体包层, 由气体分子或原子以及气溶胶组成, 在温度较高的上层大气中可能还存在等离子体^[138]. 大气形成初期的组成成分通常取决于原行星气体盘, 主要为H和He, 随着演化阶段的不同大气成分也随之改变, 巨行星通常会保留它们的原始大气, 而类地行星在岩浆活动、大气逃逸、星风、小行星及彗星撞击等的影响下, 大气成分会有较大的改变^[139]. 行星大气中碳和氧元素的比率反映了行星的氧化还原反应, 金属丰度等的测量也有利于确定行星形成的初始位置及演化过程^[138]. 探测大气逃逸的传统方法是在行星凌星时探测电离大气中的Ly α 吸收线, 但该吸收线的测量受地球大气的影响较大, 需要空间望远镜的支持. 近年, Oklopčić和Hirata^[140]提出使用地面望远镜测量He 10830 Å吸收线可探测热木星和热海王星的大气外流, 如Guilluy等人在热木星HD 189733 b凌星时获得的高分辨率透射光谱中探测到了He吸收线^[141].

M型恒星周围的行星由于距离恒星普遍较近, 受恒星磁场活动引起的强X射线、极紫外辐射以及星风等影响, 行星表面大气更易被电离且发生逃逸, 甚至可能完全被剥离^[142]. 根据哈勃空间望远镜观测结果, 超级地球K2-18 b正在经历氢原子大气逃逸, 且大气中有存在水的迹象^[60, 143]. Ehrenreich等^[144]利用温暖海王星GJ 436 b大气中探测到的大量Ly α 线描绘了该行星类似彗尾的大气逃逸图, 在该行星大气中未探测到H α 线, 表明大气层中的氢均以基态形式存在^[145-146]. Spitzer空间望远镜的8 μ m红外波段观测数据还显示, GJ 436 b的大气包层中含有H、He、H₂O和CH₄等分子, 且由于该行星温度较低, 可能还含有NH₃分子^[147]. 部分行星的大气光谱中未探测到明显的特征吸收线, 如类地行星GJ 1214 b^[148-150]和GJ 1132 b^[151-152]等, 据推测此类行星很可能存在厚重的H/He和雾霾包层. Nascimbeni等^[153]通过大双筒望远镜(Large Binocular Telescope, LBT)分别在紫外(波长 $\lambda_c = 357.5$ nm)和红外波段($\lambda_c = 963.5$ nm)发现温暖类天王星GJ 3470 b的大气中存在瑞利散射, 并推测很可能是由于存在较厚的H/He和雾霾包层, 后被多项观测证实^[154-159].

行星大气观测为确定大气成分提供了强有力的依据, 不同的大气成分及液态水的含量有利于对该行星的形成过程及宜居性做出预判. 目前行星大气的研究受观测手段及设备精度等的影响均处于起步阶段, 未来JWST (James Webb Space Telescope)望远镜发射后将消除地面大气对行星大气观测的影响, 实现高精度的大气观测, 因此行星大气将会成为未来行星科学领域的一大热点课题.

6 总结与展望

M型恒星作为银河系中数量最多的恒星类型, 由于在其周围形成的行星通常距离主星较近更利于观测, 近些年已逐渐成为寻找系外类地行星的主要观测目标. 本文主要介绍了M型恒星周围的行星特征, 包括行星特征统计分析、不同类型的行星出现率、行星形成理论、大气及原行星盘观测等.

本文基于筛选的401颗环绕M型恒星的行星, 统计分析了M型恒星周围行星的物理特征. 研究发现, 类地行星、类海王星及巨行星的占比分别约74.3%、10.2%和15.5%, 其中约88%的行星距离主星小于1 au. 约60%的行星位于多行星系统中, 轨道分布通常较为紧密且近似位于轨道共振附近. 质量-半径关系分析发现, 小于 $4M_{\oplus}$ 的大部分行星可能是由65%的硅酸盐和35%的铁组成, 而大于 $4M_{\oplus}$ 的行星半径随质量增加而迅速增长. 此外, 本文还罗列了位于宜居带内具有潜在宜居性的行星及其参数.

行星出现率是表征恒星周围行星形成效率的重要参考指标. 研究表明行星出现率随行星半径变化而变化, M型恒星周围生成行星的概率按类地行星、超级地球、亚海王星和巨行星的顺序逐级递减. 总体而言, 平均每一颗M型恒星周围就有2–2.5颗小质量行星, 而巨行星的概率则不到10%^[68, 72]. 除了行星自身特性, 主星特性也会影响行星的出现率. 恒星质量越大, 金属丰度越高, 生成巨行星的概率就越大^[66], 反之则更可能生成小质量行星, 如M型恒星周围小质量行星的形成概率约是F、G、K型恒星的3.5倍, 而巨行星生成率则比F、G、K型恒星小一个量级^[79]. 对于相同光谱型的恒星, 恒星晚期周围出现行星的概率比早期高, M型中期恒星的行星出现率约为早期的两倍^[85].

M型恒星周围行星的形成机制中较容易被接受的是在核吸积理论框架的基础上提出的行星胚胎起源于雪线位置的假说^[98], 不仅缩短了行星吸积过程的时标, 还解决了行星形成过程中水运输的问题, 使宜居带内的行星有了存在生命的可能. 但该理论对于发生流体或盘不稳定性初始条件尚不明确, 有待未来进一步的研究. 行星的形成与演化研究离不开原行星盘, 对原行星盘的观测和研究也是行星科学领域的一大重点. 本文简要介绍了原行星盘的观测现状, 包括过渡盘和晚期的碎片盘, 这些盘结构为行星形成研究提供了初始条件和有力支撑. 行星形成晚期会吸积原行星盘中的气体并逐渐形成行星大气, 对行星大气特征的观测通常通过透射光谱、热辐射和反射光谱、直接成像或高分辨率的多普勒光谱仪获得, 其中以透射光谱分析最为常见^[160]. 目前对大气的观测并不多, 仅少数温暖巨行星的透射光谱中观测到了H和He的吸收线, 且H多以基态形式存在. 针对部分透射光谱没有显示任何特征的行星, 科学家们推测该行星表面可能不存在大气, 或在其上空有较为厚重的云层. 此外, 在部分行星大气中探测到可能存在液态水的迹象, 为M型恒星周围宜居行星的研究提供了观测依据.

目前大部分环绕M型恒星的行星均由Kepler空间望远镜发现, 但近几年欧洲空间局(ESA)和美国国家航空航天局(NASA)分别发射了Gaia和TESS空间望远镜, 旨在近邻恒星周围搜寻系外行星. TESS对于特定的观测目标将持续开展长达27 d的观测, 因此更有利于发现大量短周期行星, 其中约75%的小质量行星环绕M型恒星运行^[161], 且大部分行星可能位于宜居带内. 对太阳系近邻已知的超级地球及类海王星等进行高精度观测的CHEOPS (Characterising Exoplanet Satellite)卫星也于2019年12月底发射成功, 预计会发现大量环绕M型恒星的行星, 进而对行星特性的了解也会更加深入. 此外, JWST望远镜及ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey Mission)任务分别预计将于2021年及2028年开始对不同光谱型恒星周围行星的大气展开观测, 分析大气组成及成分. 我国也预计于2026年发射中国空间站“巡天号”光学舱, 其观测视场将达到哈勃太空望远镜的300倍以上. 2028年, 我国拟发射空间科学卫星开展近邻宜居行星巡天计划(Closeby Habitable Exoplanet Survey, CHES), 基于天体测量法

实现微角秒级星间距的测量精度, 在太阳系近邻搜寻适宜居住的另一颗地球. 此外, 国内还将于2030年开展觅音计划, 通过直接成像手段发现和证认太阳系外宜居行星并刻画其宜居性. 因此, M型恒星周围行星的探测和研究将会是行星科学领域一大热点, 这些研究围绕行星大气探测, 行星宜居性与行星形成与演化等前沿科学问题, 不仅可了解行星系统形成演化的细致物理图像, 亦可回答我们太阳系自身的起源.

参考文献

- [1] Chabrier, G. *ApJ*, 2003, 586: L133
- [2] Charbonneau D, Brown T M, Latham D W, et al. *ApJ*, 2000, 529: L45
- [3] McCullough P R, Stys J E, Valenti J A, et al. *ApJ*, 2006, 648: 1228
- [4] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. *Science*, 2010, 327: 977
- [5] Borucki W J, Koch D G, Basri G, et al. *ApJ*, 2011, 736: 19
- [6] Batalha N M, Rowe J F, Bryson S T, et al. *ApJS*, 2013, 204: 24
- [7] Butler R P, Vogt S S, Marcy G W, et al. *ApJ*, 2004, 617: 580
- [8] Johnson J A, Butler R P, Marcy G W, et al. *ApJ*, 2007, 670: 833
- [9] Marcy G W, Butler R P, Fischer D, et al. *ApJ*, 2001, 556: 296
- [10] Rivera E J, Lissauer J J. *ApJ*, 2001, 558: 392
- [11] Lee M H, Peale S J. *ApJ*, 2002, 567: 596
- [12] Ji J H, Li G Y, Liu L. *ApJ*, 2002, 572: 1041
- [13] Kley W, Lee M H, Murray N, et al. *A&A*, 2005, 437: 727
- [14] Bonfils X, Forveille T, Delfosse X, et al. *A&A*, 2005, 443: L15
- [15] Bonfils X, Mayor M, Delfosse X, et al. *A&A*, 2007, 474: 293
- [16] Bonfils X, Delfosse X, Udry S, et al. *A&A*, 2013, 549: A109
- [17] Johnson J A, Howard A W, Marcy G W, et al. *PASP*, 2010, 122: 149
- [18] Nutzman P, Charbonneau, D. *PASP*, 2008, 120: 317
- [19] Irwin J, Charbonneau D, Nutzman P, et al. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2008, 4: 37
- [20] Quirrenbach A, Amado P J, Caballero J A, et al. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2010, 6: 545
- [21] Quirrenbach A, Amado P J, Caballero J A, et al. *Proceedings of SPIE 9147, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*. Montréal: SPIE, 2014, 9147: 91471F
- [22] Alonso-Floriano F J, Morales J C, Caballero J A, et al. *A&A*, 2015, 577: A128
- [23] Delfosse X, Bonfils X, Forveille T, et al. *A&A*, 2013, 553: A8
- [24] Moutou C, Hébrard E M, Morin J, et al. *MNRAS*, 2017, 472: 4563
- [25] Mahadevan S, Ramsey L, Bender C, et al. *Proceedings of SPIE 8446, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*. Amsterdam: SPIE, 2012, 8446: 84461S
- [26] Stefansson G, Hearty F, Robertson P, et al. *ApJ*, 2016, 833: 175
- [27] Crossfield I J M, Ciardi D R, Petigura E A, et al. *ApJS*, 2016, 226: 7
- [28] Schlieder J E, Crossfield I J M, Petigura E A, et al. *ApJ*, 2016, 818: 87
- [29] Cloutier R, Astudillo-Defru N, Doyon R, et al. *A&A*, 2017, 608: A35
- [30] Vanderspek R, Huang C X, Vanderburg A, et al. *ApJ*, 2019, 871: L24
- [31] Cloutier R, Eastman J D, Rodriguez J E, et al. *AJ*, 2020, 160: 3
- [32] Astudillo-Defru N, Cloutier R, Wang S X, et al. *A&A*, 2020, 636: A58
- [33] Delrez L, Gillon M, Queloz D, et al. *Proceedings of SPIE 10700, Ground-Based and Airborne Telescopes VII*. Austin: SPIE, 2018, 10700: 107001I
- [34] Mercer A, Stamatellos D. *A&A*, 2020, 633: A116
- [35] Bitsch B, Lambrechts M, Johansen A. *A&A*, 2015, 582: A112

- [36] Rajpurohit A S, Kumar V, Srivastava M K, et al. MNRAS, 2020, 492: 5844
- [37] Montet B T, Morton T D, Foreman-Mackey D, et al. ApJ, 2015, 809: 25
- [38] Weiss L M, Marcy G W, Petigura E A, et al. AJ, 2018, 155: 48
- [39] Chambers J E. ApJ, 2006, 652: L133
- [40] Jin S, Mordasini C, Parmentier V, et al. ApJ, 2014, 795: 65
- [41] Jin S, Mordasini C. ApJ, 2018, 853: 163
- [42] Fortney J J, Marley M S, Barnes J W. ApJ, 2007, 659: 1661
- [43] Mocquet A, Grasset O, Sotin C. RSP TA, 2014, 372: 20130164
- [44] Yan D D, Guo J H. ApJ, 2019, 880: 90
- [45] Makarov V V, Berghea C, Efroimsky M. ApJ, 2012, 761: 83
- [46] Bolmont E, Raymond S N, Von Paris P, et al. ApJ, 2014, 793: 3
- [47] Goldreich P, Tremaine S. ApJ, 1980, 241: 425
- [48] Günther M N, Pozuelos F J, Dittmann J A, et al. NatAs, 2019, 3: 1099
- [49] Luger R, Sestovic M, Kruse E, et al. NatAs, 2017, 1: 0129
- [50] Lee M H, Fabrycky D, Lin D N C. ApJ, 2013, 774: 52
- [51] Hands T O, Alexander R D, Dehnen W. MNRAS, 2014, 445: 749
- [52] Wang S, Ji J H. ApJ, 2014, 795: 85
- [53] Sun Z, Ji J H, Wang S, et al. MNRAS, 2017, 467: 619
- [54] Wang S, Ji J H. AJ, 2017, 154: 236
- [55] Pan M R, Wang S, Ji J H. MNRAS, 2020, 496: 4688
- [56] Wang S, Lin D N C, Zheng X C, et al. AJ, 2021, 161: 77
- [57] Selsis F, Kasting J F, Levrard B, et al. A&A, 2007, 476: 1373
- [58] Joshi M. AsBio, 2003, 3: 415
- [59] Pierrehumbert R T. ApJ, 2011, 726: L8
- [60] Tsiaras A, Waldmann I P, Tinetti G, et al. NatAs, 2019, 3: 1086
- [61] Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. 1993, Icar, 101: 108
- [62] Kopparapu R K, Ramirez R, Kasting J F, et al. ApJ, 2013, 765: 131
- [63] Dittmann J A, Irwin J M, Charbonneau D, et al. Nature, 2017, 544: 333
- [64] Anglada-Escudé G, Tuomi M, Gerlach E, et al. A&A, 2013, 556: A126
- [65] Bonfils X, Lo Curto G, Correia A C M, et al. A&A, 2013, 556: A110
- [66] Johnson J A, Aller K M, Howard A W, et al. PASP, 2010, 122: 905
- [67] Dressing C D, Charbonneau D. ApJ, 2013, 767: 95
- [68] Dressing C D, Charbonneau D. ApJ, 2015, 807: 45
- [69] Gaidos E, Mann A W, Kraus A L, et al. MNRAS, 2016, 457: 2877
- [70] Hsu D C, Ford E B, Terrien R. MNRAS, 2020, 498: 2249
- [71] Endl M, Cochran W D, Kürster M, et al. ApJ, 2006, 649: 436
- [72] Montet B T, Crepp J R, Johnson J A, et al. ApJ, 2014, 781: 28
- [73] Cassan A, Kubas D, Beaulieu J P, et al. Nature, 2012, 481: 167
- [74] Clanton C, Gaudi B S. ApJ, 2014, 791: 91
- [75] Kopparapu R K. ApJ, 2013, 767: L8
- [76] Tuomi M, Jones H R A, Barnes J R, et al. MNRAS, 2014, 441: 1545
- [77] Gaidos E, Mann A W. ApJ, 2014, 791: 54
- [78] Neves V, Bonfils X, Santos N C, et al. A&A, 2013, 551: A36
- [79] Mulders G D, Pascucci I, Apai D. ApJ, 2015, 814: 130
- [80] Fressin F, Torres G, Charbonneau D, et al. ApJ, 2013, 766: 81
- [81] Silburt A, Gaidos E, Wu Y Q. ApJ, 2015, 799: 180
- [82] Marcy G, Butler R P, Fischer D, et al. PThPS, 2005, 158: 24
- [83] Cumming A, Butler R P, Marcy G W, et al. PASP, 2008, 120: 531
- [84] Bowler B P, Johnson J A, Marcy G W, et al. ApJ, 2010, 709: 396
- [85] Hardegree-Ullman K K, Cushing M C, Muirhead P S, et al. AJ, 2019, 158: 75

- [86] Laughlin G, Bodenheimer P, Adams F C. *ApJ*, 2004, 612: L73
- [87] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2005, 626: 1045
- [88] Liu B S, Ji J H. *RAA*, 2020, 20: 164
- [89] Manara C F, Robberto M, Da Rio N, et al. *ApJ*, 2012, 755: 154
- [90] Liu B B, Lambrechts M, Johansen A, et al. *A&A*, 2020, 638: A88
- [91] Manara C F, Rosotti G, Testi L, et al. *A&A*, 2016, 591: L3
- [92] Baraffe I, Chabrier G, Barman T S, et al. *A&A*, 2003, 402: 701
- [93] Baraffe I, Homeier D, Allard F, et al. *A&A*, 2015, 577: A42
- [94] Raymond S N, Scalo J, Meadows V S. *ApJ*, 2007, 669: 606
- [95] Coleman G A L, Nelson R P. *MNRAS*, 2016, 457: 2480
- [96] Ormel C W, Klahr H H. *A&A*, 2010, 520: A43
- [97] Lambrechts M, Johansen A. *A&A*, 2012, 544: A32
- [98] Ormel C W, Liu B B, Schoonenberg D. *A&A*, 2017, 604: A1
- [99] Schoonenberg D, Liu B B, Ormel C W, et al. *A&A*, 2019, 627: A149
- [100] Grimm S L, Demory B O, Gillon M, et al. *A&A*, 2018, 613: A68
- [101] Dorn C, Mosegaard K, Grimm S L, et al. *ApJ*, 2018, 865: 20
- [102] De Wit J, Wakeford H R, Gillon M, et al. *Nature*, 2016, 537: 69
- [103] Liu B B, Lambrechts M, Johansen A, et al. *A&A*, 2019, 632: A7
- [104] Laughlin G, Bodenheimer P. *ApJ*, 1994, 436: 335
- [105] Cassen P M, Smith B F, Miller R H, et al. *Icar*, 1981, 48: 377
- [106] Gammie C F. *ApJ*, 2001, 533: 174
- [107] Johnson B M, Gammie C F. *ApJ*, 2003, 597: 131
- [108] Rice W K M, Armitage P J, Bonnell I A, et al. *MNRAS*, 2003, 346: L36
- [109] Rice W K M, Lodato G, Armitage P J. *MNRAS*, 2005, 364: L56
- [110] Hopkins P F, Christiansen J L. *ApJ*, 2013, 776: 48
- [111] Takahashi S Z, Inutsuka S I, Machida M N, *ApJ*, 2013, 770: 71
- [112] Boss A P. *ApJ*, 2006, 643: 501
- [113] Dodson-Robinson S E, Veras D, Ford E B, et al. *ApJ*, 2009, 707: 79
- [114] Lada C J, Wilking B A. *ApJ*, 1984, 287: 610
- [115] Andre P, Ward-Thompson D, Barsony M. *ApJ*, 1993, 406: 122
- [116] Andre P, Montmerle T. *ApJ*, 1994, 420: 837
- [117] Andrews S M, Wilner D J, Espaillat C, et al. *ApJ*, 2011, 732: 42
- [118] Espaillat C, Ingleby L, Hernández J, et al. *ApJ*, 2012, 747: 103
- [119] Jin S, Li S T, Isella A, et al. *ApJ*, 2016, 818: 76
- [120] Huang P H, Isella A, Li H, et al. *ApJ*, 2018, 867: 3
- [121] Jin S, Isella A, Huang P H, et al. *ApJ*, 2019, 881: 108
- [122] Huang P H, Dong R B, Li H, et al. *ApJ*, 2019, 883: L39
- [123] Huang P H, Li H, Isella A, et al. *ApJ*, 2020, 893: 89
- [124] Andrews S M, Rosenfeld K A, Kraus A L, et al. *ApJ*, 2013, 771: 129
- [125] Ward-Duong K, Patience J, Bulger J, et al. *ApJ*, 2018, 155: 54
- [126] Van Der Plas G, Ménard F, Ward-Duong K, et al. *ApJ*, 2016, 819: 102
- [127] Barenfeld S A, Carpenter J M, Ricci L, et al. *ApJ*, 2016, 827: 142
- [128] Plavchan P, Jura M, Lipsky S J. *ApJ*, 2005, 631: 1161
- [129] Plavchan P, Werner M W, Chen C H, et al. *ApJ*, 2009, 698: 1068
- [130] Binks A S, Jeffries R D. *MNRAS*, 2016, 455: 3345
- [131] Liu M C, Matthews B C, Williams J P, et al. *ApJ*, 2004, 608: 526
- [132] Lestrade J F, Wyatt M C, Bertoldi F, et al. *A&A*, 2006, 460: 733
- [133] Lestrade J F, Wyatt M C, Bertoldi F, et al. *A&A*, 2009, 506: 1455
- [134] Lestrade J F, Matthews B C, Sibthorpe B, et al. *A&A*, 2012, 548: A86
- [135] Binks A. *IAUS*, 2016, 314: 159

- [136] Avenhaus H, Schmid H M, Meyer M R. *A&A*, 2012, 548: A105
- [137] Theissen C A, West A A. *ApJ*, 2014, 794: 146
- [138] Zhang X. *RAA*, 2020, 20: 099
- [139] Kral Q, Davoult J, Charnay B. *NatAs*, 2020, 4: 769
- [140] Oklopčić A, Hirata C M. *ApJ*, 2018, 855: L11
- [141] Guilluy G, Andretta V, Borsa F, et al. *A&A*, 2020, 639: A49
- [142] Lammer H, Eybl V, Kislyakova K G, et al. *Ap&SS*, 2011, 335: 39
- [143] Dos Santos L A, Ehrenreich D, Bourrier V, et al. *A&A*, 2020, 634: L4
- [144] Ehrenreich D, Bourrier V, Wheatley P J, et al. *Nature*, 2015, 522: 459
- [145] Lanotte A A, Gillon M, Demory B O, et al. *A&A*, 2014, 572: A73
- [146] Cauley P W, Redfield S, Jensen A G. *AJ*, 2017, 153: 81
- [147] Demory B O, Gillon M, Barman T, et al. *A&A*, 2007, 475: 1125
- [148] Désert J M, Bean J, Kempton E M R, et al. *ApJ*, 2011, 731: L40
- [149] Berta Z K, Charbonneau D, Désert J M, et al. *ApJ*, 2012, 747: 35
- [150] Kreidberg L, Bean J L, Désert J M, et al. *Nature*, 2014, 505: 69
- [151] Southworth J, Mancini L, Madhusudhan N, et al. *AJ*, 2017, 153: 191
- [152] Diamond-Lowe H, Berta-Thompson Z, Charbonneau D, et al. *AJ*, 2018, 156: 42
- [153] Nascimbeni V, Piotto G, Pagano I, et al. *A&A*, 2013, 559: A32
- [154] Crossfield I J M, Barman T, Hansen B M S, et al. *A&A*, 2013, 559: A33
- [155] Bourrier V, Des Etangs A L, Ehrenreich D, et al. *A&A*, 2018, 620: A147
- [156] Biddle L I, Pearson K A, Crossfield I J M, et al. *MNRAS*, 2014, 443: 1810
- [157] Ehrenreich D, Bonfils X, Lovis C, et al. *A&A*, 2014, 570: A89
- [158] Ninan J P, Stefansson G, Mahadevan S, et al. *ApJ*, 2020, 894: 97
- [159] Palle E, Nortmann L, Casasayas-Barris N, et al. *A&A*, 2020, 638: A61
- [160] Madhusudhan N, Agúndez M, Moses J I, et al. *SSRv*, 2016, 205: 285
- [161] Sullivan P W, Winn J N, Berta-Thompson Z K, et al. *ApJ*, 2015, 809: 77

The Statistical Investigation of Exoplanets around M Dwarfs

PAN Meng-ru^{1,2,3} JI Jiang-hui^{1,2,3} WANG Su^{1,2,3}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 CAS Key Laboratory of Planetary Sciences, Nanjing 210023)

(3 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026)

ABSTRACT M dwarf is not only one of the lowest mass star in the main sequence stars, but also the most numerous stars in the Milky Way. Planets and habitable zones around M dwarfs are usually closer to their host star than F, G, K-type stars, so it is more convenient for us to discover new planets and observe habitable planets. On average, there are 2.5 low-mass planets orbiting M dwarf, which is about 3.5 times that of F, G, K star, while the occurrence rate of giant planets, which greatly depends on the metallicity of their host stars, is one order of magnitude lower than that of F, G, K star. Herein we apply a set of selection criteria to collect 401 planets around M dwarfs to investigate the property of planets. Statistical analysis shows that terrestrial planets, whose semi-major axes are less than 1 au, account for about 74% of the total number of planets. About twenty-eight Earth-sized planets orbit within the habitable zone of

their stars, which means there might be liquid water and atmosphere on planet surface. In addition, the average distance between planets and their host stars tends to increase with the masses of planets. According to the planetary mass-radius relationship, there is a turning point at $4M_{\oplus}$. With few exceptions, most planets with mass $< 4M_{\oplus}$ may be composed of 65% silicate and 35% iron, otherwise the radius of planet grows rapidly with the increase of mass because of a substantial gaseous envelope. Approximately 60% planets around M dwarfs are in tightly packed planetary systems, whose orbital configuration are observed to be trapped into 3 : 2, 5 : 3 and 2 : 1 mean motion resonances. To explain the formation of compact system, several scenarios have been proposed, for instance inside-out formation and pebble-driven planet formation, even though the initial position of planetary embryos remain ambiguous. The formation of giant planets around low-mass stars also challenges the existing planet formation theory. Fortunately, high precision and resolution observation of space and ground-based telescopes are unveiling the structure of protoplanetary disks gradually, which offers the crucial initial conditions of planet formation, as well as the observation of planetary atmospheric composition.

Key words stars: low-mass, stars: planetary systems, methods: statistical