

崛起的新行星：超级地球和亚海王星*

谢基伟^{1,2†}

(1 南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)

(2 现代天文与天体物理教育部重点实验室 南京 210023)

摘要 随着观测技术的发展,发现太阳系外行星是预料之中的.然而,不曾料到的是,近几年探测发现的大多数系外行星却在太阳系中找不到一个对应的模版.它们的大小介于地球和海王星之间,被称为超级地球和亚海王星.简要地介绍这一类崛起的新行星物种,归纳和总结目前对它们的物理性质、轨道性质以及形成起源的理解.最后展望未来这方面的一些期待.

关键词 行星和卫星: 探测, 行星和卫星: 形成

中图分类号: P139; **文献标识码:** A

1 新的发现和新的疑惑

过去几千年人类对行星的认识范围仅局限在太阳系内,数目也仅8颗.而自从1995年在类太阳恒星周围发现第1颗系外行星^[1]51 Peg b以来,短短的二十年来,人类通过各种探测方法已经发现了数千颗太阳系外行星(图1).很多系外行星是我们从太阳系无法获知的.与太阳系相比,它们可以说是异类.比如51 Peg b就是一个典型的异类.它是一颗类木行星,但距离它的主星只有地球距离太阳的1/20(轨道半长径约等于0.05 au),所以表面很热,被称为热木星.之后的研究发现热木星其实是相当稀少的(100颗类太阳恒星周围只有1颗左右^[2-8]),因此这样的“少数派异类”似乎并没有颠覆太阳系行星在人们对行星认识上的传统标准地位.

然而,最近的一些系外行星探测(特别是美国NASA (National Aeronautics and Space Administration)的Kepler系外行星探测计划)却发现了另外一些异类,这些异类与太阳系里的行星风格迥异,但是它们在银河系中数量很多且很普遍以至于人们开始疑惑:难道我们太阳系中的行星才是异类?这些就是我们接下来要介绍的行星世界中正在崛起的新物种:超级地球和亚海王星.

目前,探测超级地球和亚海王星最主要的方法是视向速度法和凌星法.前者的原理是:行星的公转其实是行星和恒星都绕它们的公共质心转动,因此通过探测恒星视向速

2017-02-28收到原稿, 2017-06-23收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11403012、11333002、11661161014)资助

†jwxie@nju.edu.cn

度的周期变化可以间接推测围绕其公转的行星. 后者的原理是: 当行星公转的轨道面与视线方向几乎平行时, 行星会周期性地遮掩恒星光, 产生周期性掩食现象, 而掩食的程度和周期就反映行星的大小和轨道周期. 由于质量或半径大且轨道周期小的行星能产生强度和频率大的视向速度或者凌星信号, 因此两种观测方法对这些行星都有很明显的观测选择效应. 研究超级地球和亚海王星的轨道特征时必须修正这些选择效应.

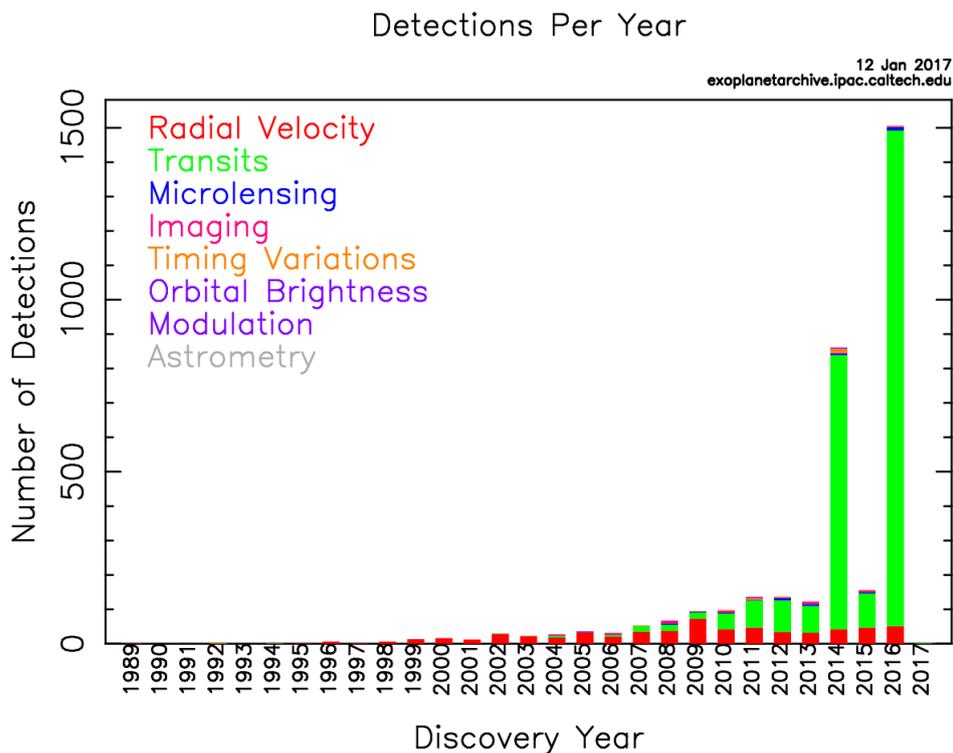


图 1 每年发现的系外行星数目分布图. 不同颜色代表不同的探测方法(图片来源于<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>).

Fig. 1 Exoplanet detections per year since 1989 (Figure adopted from <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>).

太阳系内至今没有发现大小在地球和海王星(半径约4个地球半径)之间的行星(超级地球或者亚海王星), 而在太阳系外这类行星的发现却越来越多(图2). 大约每3颗类太阳恒星周围就会有一颗超级地球或亚海王星存在^[2-3,8-9]. 与类木行星倾向存在于质量和金属丰度较大的恒星周围不同, 超级地球和亚海王星的高存在率似乎与宿主恒星的金属丰度关系不那么敏感^[10-13]. 各种光谱型和金属丰度的恒星周围都有超级地球和亚海王星. 超级地球与亚海王星之间的区分主要看行星的内部组成. 一般来说, 平均密度较高、内部组成更类似地球这样的岩石类行星是超级地球; 而密度较低、含有更多的挥发性物质和浓厚大气的行星是亚海王星. 有些研究发现超级地球和亚海王星的大概界限是在1.5-2倍地球半径之间^[14-15]. 然而需要指出的是这个分界并不是绝对的, 因为大量的观测显示半径在地球和海王星之间的行星密度分布非常广泛^[16-18], 表明它们的内部组成是非常丰富和多样的(图3).

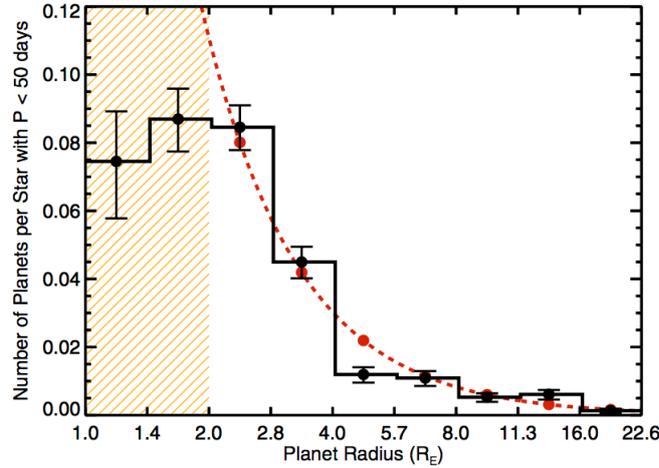


图2 系外行星存在率与行星半径的关系. 图片来源于参考文献[2], 其中 R_E 代表地球半径.

Fig. 2 Planet occurrence rate as a function of planetary radius. Figure adopted from reference [2], here R_E denotes the radius of the Earth.

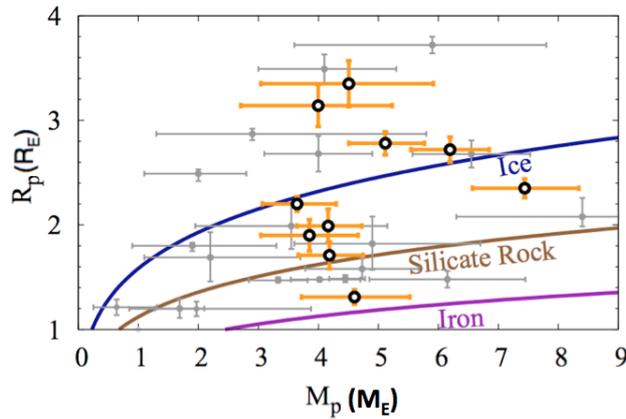


图3 超级地球和亚海王星的质量 M_p 和半径 R_p 分布. 图片来源于参考文献[18], 其中 M_E 代表地球质量.

Fig. 3 The mass (M_p) and radius (R_p) distribution of known super-Earths and sub-Neptunes. Figure adopted from reference [18], here M_E denotes the mass of the Earth.

随着超级地球和亚海王星的大量发现, 一个丰富多样的行星世界逐渐展现在我们面前, 同时也留下了很多新的疑惑: 超级地球和亚海王星系统还有什么其他特征? 超级地球和亚海王星是如何形成的? 为什么太阳系中没有形成超级地球和亚海王星? 下面我们就带着这些问题对超级地球和亚海王星做进一步的了解. 需要指出的是关于超级地球和亚海王星的研究内容非常丰富, 由于篇幅限制, 本文主要从其中一个角度: 轨道特征和形成机制方面做介绍. 感兴趣的读者还可以关注了解超级地球和亚海王星的大气和宜居性等方面的研究进展^[19–24].

2 超级地球和亚海王星的轨道构型特征

行星系统的轨道特征往往能提供一些线索让我们去了解它们形成和演化的历史. 本

节我们介绍发现的众多超级地球和亚海王星系统, 重点了解它们在轨道构型上显现了哪些值得注意的统计特征.

2.1 轨道距离和周期

观测上一个很明显的特征是, 大部分探测到的超级地球和亚海王星的轨道距离其主星都非常近. 如图4所示^[25], Kepler卫星观测到的大部分超级地球和亚海王星的轨道都比太阳系中水星轨道(公转轨道周期88 d)还小. 当然这幅图显示的是实际观测到的数目, 并没有考虑观测的选择效应和探测效率. 如果把这些因素考虑进去的话, Kepler探测到的超级地球和亚海王星的本征数频率随公转周期增大而增大, 在周期为10 d左右达到最大后趋于平稳(如图5)直到250 d^[9]. 这个结果和地面视向速度搜寻给出的结果不一致. 后者显示在轨道周期大于100 d的时候, 超级地球和亚海王星的分布有断崖式的下降^[8]. 出现分歧的原因目前还不清楚. 但要注意的是, Kepler凌星搜寻和地面视向速度法搜寻对周期大于100 d的行星搜寻效率都大大降低, 因此这个问题的澄清需要后续观测进一步的考证. 对距离宿主恒星更远的行星探测常依靠微引力透镜法. 该方法探测发现雪线(距离宿主恒星2-3 au, 周期一般在1000-2000 d)以外的行星也较多^[26-27], 但探测到的大部分行星质量大于海王星. 未来的空间搜寻项目WFIRST (Wide Field Infrared Survey Telescope)^[28]有望揭示更多的在雪线以外的超级地球和亚海王星.

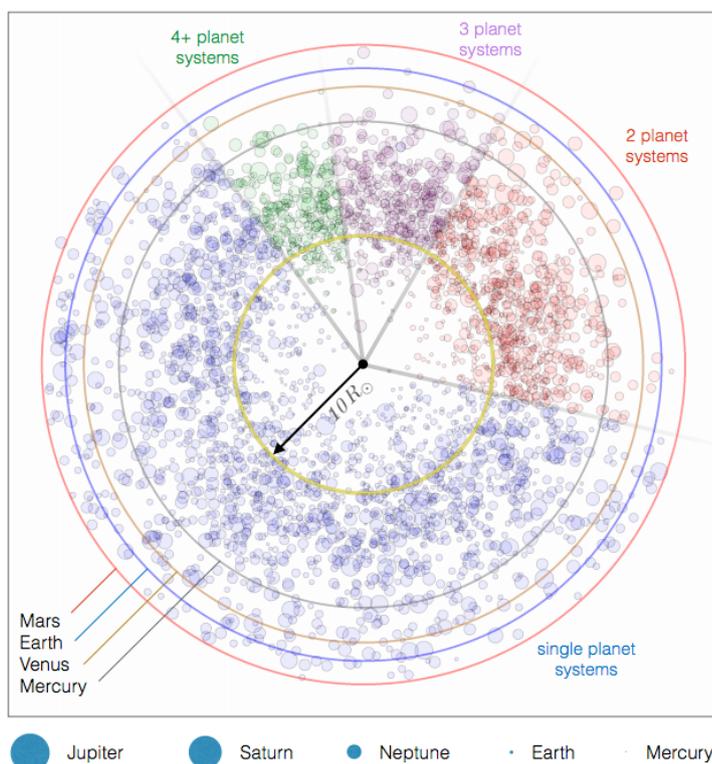


图 4 Kepler探测到的系外行星的轨道分布, 大部分的轨道比水星的公转轨道还小. 图片来自文献[25], R_{\odot} 为太阳半径.

Fig. 4 Orbital distances of planets detected with Kepler, most planets have orbital distance smaller than Mercury's orbit. Figure adopted from reference [25], here R_{\odot} indicates the radius of the Sun.

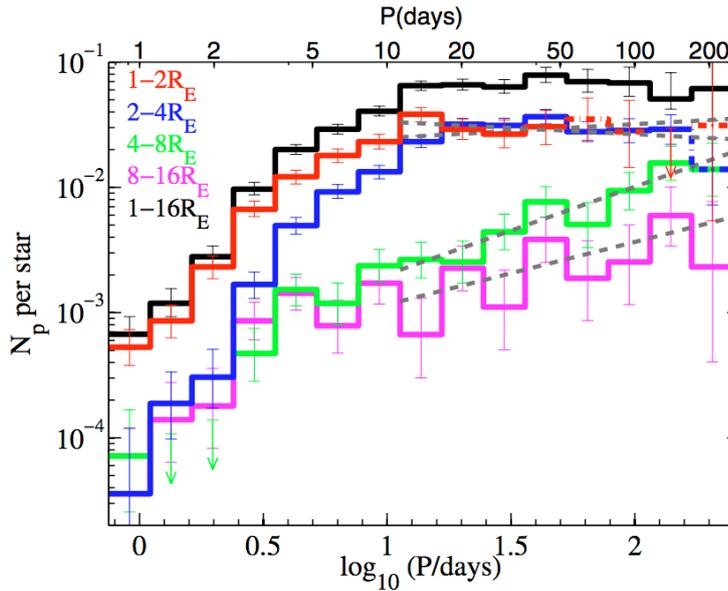


图 5 Kepler 数据统计不同大小的行星存在率与轨道周期的关系. 图片来自文献[9], 其中 P 为轨道周期, N_p 为行星数.

Fig. 5 Occurrence rate as a function of orbital period for the Kepler planets with various sizes. Figure adopted from reference [9], here P indicates the orbital period, N_p is the number of planets.

2.2 单行星系统与多行星系统

超级地球和亚海王星的一个很重要的特征是, 它们经常是以多行星的形式结伴出现在同一个系统中. 视向速度法巡天发现, 对于质量小于30个地球质量的系统, 多行星系统的比例超过70%. 通过凌星探测法, Kepler发现的所有多行星系统的比例占总发现比例的20%左右^[29]. 而如果只考虑超级地球和亚海王星系统的话, Kepler发现的多行星系统比例约为35%^[29]. 这两种不同探测方法的结果不能直接比较. 正确的比较必须考虑以下因素^[30]: (1)行星质量半径的对应关系; (2)两种探测方法的选择效应.

需要注意的是Kepler探测到的单行星系统严格意义上应该叫做单凌星系统. 单凌星系统主要有两个来源. 一个可能是该系统本身其实是多行星系统, 但由于观测角度的原因只看到一颗行星发生凌星. 另一个可能是该系统本身就是单星系统. 目前Kepler的统计结果显示这两个来源大约各占一半^[31-33].

2.3 轨道间距

描述多行星系统中不同行星轨道的间隔通常有两种方法. 一种是用轨道半长径之差, 另一种是用轨道周期比. 轨道间隔的分布往往能反映一些规律, 透露一些行星形成和演化的线索. 对于太阳系, 如果从轨道半长径看, 行星的轨道半长径似乎符合提丢斯-波得定则, 即 $a = 0.4 + 0.3 \times 2^m$ au, $m = -\infty, 0, 1, 2, \dots$ 由里及外分别代表水星、金星、地球和火星等. 唯一例外的是海王星实际观测值(30.06 au)与提丢斯-波得定则预言(38.8 au)的差别很大, 对提丢斯-波得定则是个挑战. 对于系外行星的轨道半长径分布, 有人也尝试寻找一个更一般化的提丢斯-波得定则^[34], 但进一步的观测搜寻并没有发现按此规则预言的行星^[35]. 因此提丢斯-波得定则在太阳系外同样遭遇了质疑和挑战. 这个经验规律的背后到底有何物理本质还不知晓. 如果从轨道的周期比看, 很多天体的轨道

周期近似等于简单的整数比, 即轨道平运动共振的一个表现. 比如木星的伽利略卫星成 $1:2:4$ 的轨道周期比. 又比如海王星和冥王星的轨道周期比接近 $2:3$. 此外小行星带天体以及柯伊伯带天体的轨道周期很多都与木星和海王星的轨道周期接近简单整数比.

图6 (a)显示Kepler探测的超级地球和亚海王星的轨道周期虽然在一些共振处(比如 $3:2$ 和 $2:1$ 附近)分布稍多一些^[36-38], 但总的特征是轨道周期比分布较为广泛, 大部分都不是在共振附近. 与此对比, 视向速度法探测到的类木行星的轨道周期往往在 $2:1$ 共振附近有聚集现象^[37]. 对于这个基本特征, 一些学者认为这些超级地球和亚海王星大多是在原地形成, 即行星形成时的轨道与恒星的距离基本和目前探测到的差不多(详见第3节). 它们通过相互碰撞聚合形成, 行星间距随机性大而不会倾向于在某些共振聚集. 另一些学者则主张这些超级地球和亚海王星是从远离恒星的外部形成, 然后迁移到当前位置的, 虽然迁移往往会在共振处产生聚集, 但是后期的动力学演化, 如星子和行星之间的散射^[39-40]、受恒星的长期潮汐作用^[41]等, 可以让行星逐步脱离共振.

超级地球和亚海王星周期比分布的另一个重要特征是在 $3:2$ 和 $2:1$ 共振处存在一些明显的不对称. 如图6 (b)和6 (c), 行星更多地分布在共振的外侧(周期比稍微大于共振中心)附近, 而在内侧(周期比稍微小于共振中心)附近有一些空洞. 关于这个周期比的不对称分布, 一些学者认为它一定程度上是由共振结构本身的非对称性造成的^[37-38]. 不过, 这些学者也注意到共振结构本身的非对称性虽然可以产生不对称的周期比分布, 但是其贡献幅度与Kepler观测到的周期不对称幅度还是有一定的差距. 这方面的主要表现是, 周期比约为 $2:1$ 的行星分布堆积在周期比 2.05 左右(如图6 (a)), 偏离共振中心 2.0 达到 0.05 , 而共振结构自身的非对称性只能贡献 $0.02-0.03$ 左右的偏离幅度. 另外一些学者则引入其他一些阻尼机制解释这个不对称性. 虽然可以解释观测, 但是引入了其他的不确定量, 即产生阻尼物质的多少(如: 星子盘密度^[39], 潮汐强度^[41]等).

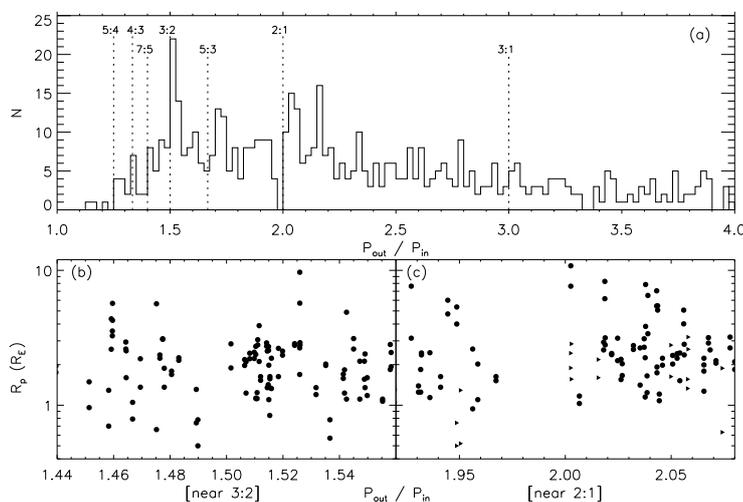


图6 (a) Kepler探测到的行星轨道周期比分布; (b) $3:2$ 共振处附近的周期比和半径分布; (c) $2:1$ 共振处附近的周期比和半径分布. 图片来源于参考文献^[36], P_{in} 和 P_{out} 代表一个行星对中的内侧和外侧行星的轨道周期.

Fig. 6 (a) Period ratio distribution of the Kepler planets; (b) period ratio-radius distribution near $3:2$ resonance; (c) period ratio-radius distribution near $2:1$ resonance. Figure adopted from reference ^[36], P_{in} and P_{out} indicate respectively the orbital periods of the inner and outer planets of a planetary pair.

此外, 我们看到在周期比小于5 : 4时行星数量很少(如图6). 这主要是因为轨道稳定性的条件在这里起了约束作用. 通常稳定的多行星系统中相邻行星的半长径间隔要大于一定的临界值, 一般要满足: $a_2 - a_1 > 10R_H$, 这里 R_H 是行星的相互希尔半径. 希尔半径可以表示为:

$$R_H = \frac{a_1 + a_2}{2} \left(\frac{m_1 + m_2}{3M_*} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

这里 a_1 和 a_2 以及 m_1 和 m_2 是相邻两个行星的轨道半长径及质量, M_* 是宿主恒星的质量. 有趣的是观测数据显示Kepler观测到的行星的轨道间距分布恰好在10倍希尔半径处有一个跳跃增长. 这种分布特征被认为是系统轨道稳定性逐渐塑造行星系统构型的结果^[42-43].

2.4 轨道偏心率和倾角

轨道偏心率和倾角是行星系统的重要性质, 携带着很多关于行星形成和演化的信息. 太阳系轨道偏心率和倾角的两大基本观测特征是: (1) 8大行星的轨道基本为近圆形(平均偏心率只有0.06); (2) 8大行星的轨道基本在同一个平面上(平均相互轨道倾角只有3°). 正是这两大线索激发了几百年前的康德和拉普拉斯提出关于太阳系形成的星云模型. 而这个模型也逐渐发展为当今行星形成的标准理论模型. 但是随着系外行星的发现, 这个标准模型迎来了挑战.

2.4.1 偏心率

系外行星的探测发现已经走过了二十多年. 前十多年主要是视向速度方法主导, 发现了几百颗系外行星, 后十年主要是凌星法崛起(特别是Kepler计划)发现了几千颗系外行星^[44]. 视向速度方法发现的几百颗系外行星的偏心率分布让人出乎意料: 大部分行星的轨道都是明显偏离圆形, 平均偏心率达到0.3^[45], 与太阳系中的行星形成鲜明反差. 这样就自然带来了一个问题: 我们太阳系中的行星及其形成在宇宙中是不是一个非主流的特例? 在回答这个问题之前, 其实我们必须清楚视向速度法给出的偏心率分布并不一定代表物理事实. 比如, 首先因为观测选择效应, 视向速度法探测到的大部分是类似木星这样的巨行星, 而我们已经知道宇宙中大部分的行星是更小的行星, 如超级地球和亚海王星; 另外视向速度观测存在一些简并(一些大偏心率观测信号可能是两个近圆形轨道信号的叠加^[46]); 此外对于小质量行星的偏心率, 视向速度法的测量往往误差较大, 置信度低^[47]. 因此要回答以上问题, 关键要看Kepler探测(凌星法)的行星偏心率分布如何.

大行星的光变曲线信噪比高, 轨道偏心率往往可以独立测量出来^[48-49], 而大多数超级地球和亚海王星的偏心率一般要通过大样本统计方法研究凌星时刻的约束或者凌星时长的约束来得到^[50-52]. 这方面的研究结果是: 大部分超级地球和亚海王星的偏心率非常低, 平均偏心率只有0.05左右(类似太阳系的行星); 小部分(10%-20%)偏心率较大(达到0.5甚至更高), 且主要分布在单行星系统中. 因此Kepler给出问题的答案是, 类似太阳系行星的近圆形轨道并不是非主流的特例而是较为普遍的代表^[53]. 将来关于偏心率的研究还需要回答: (1)偏心率和行星大小的关系; (2)偏心率和行星组成是否有关系; (3)偏心率和轨道周期的关系; (4)偏心率和宿主恒星是怎样的关系. 这些问题的答案将进一步加深我们对行星形成的理解.

2.4.2 轨道倾角

这里谈的轨道倾角往往有两层意思. 一个是多行星系统中的轨道相互倾角. 另一个是行星的轨道面相对于宿主恒星自转面的夹角.

首先来看轨道相互倾角. 在太阳系, 8大行星间的平均相互轨道倾角只有 3° 左右. 而在太阳系外, 能直接测量到的相对倾角的系统仅限于少数观测数据较丰富、行星半径或质量较大(信噪比高)的行星. 比如, 通过分析视向速度数据, 很多研究测量得到GJ876系统的2颗巨行星的轨道相互倾角在 5° 以内^[53-55]. Kepler 89系统的2颗行星被发现互相掩食, 因此得出2颗行星的轨道相互倾角在 $1^\circ-2^\circ$ 左右^[56]. 此外也有一些明显非共面的例子. 比如, 视向速度数据结合天体测量数据发现Gamma And里的3颗行星的轨道相互倾角在 30° 左右^[57]. 对于大多数较小的行星, 如超级地球和亚海王星, 它们轨道倾角的测量往往借助于统计方法. 这些方法有的是通过拟合多行星系统的比例^[58], 有的是通过拟合凌星时长的分布^[36,51-52,59], 有的是结合视向速度和凌星观测数据^[30]. 总的来说, 无论是单个的直接测量结果还是通过统计方法得到的结果, 共面构型还是占主导的, 但是也不能忽视一些高倾斜轨道构型的存在. 天体的轨道偏心率 and 轨道倾角通常会相互关联. 理论和观测上都揭示了一个普遍规律: 一个引力主导(其他阻尼如: 潮汐和气体拖拽等可以忽略的情况)的动力学系统, 轨道的平均偏心率和平均轨道倾角呈一个简单的线性关系(如图7所示). 从图中可以看到, 太阳系天体和太阳系外行星都很好地满足这个规律, 侧面反映: 从轨道特征方面看, 太阳系其实是有一定代表性的. 这个规律其实是一个更普遍的物理规律, 即能量均分定理的具体体现之一. 轨道偏心率和倾角的大小其实代表了轨道在偏离平面圆形的各个维度上的能量大小^[60].

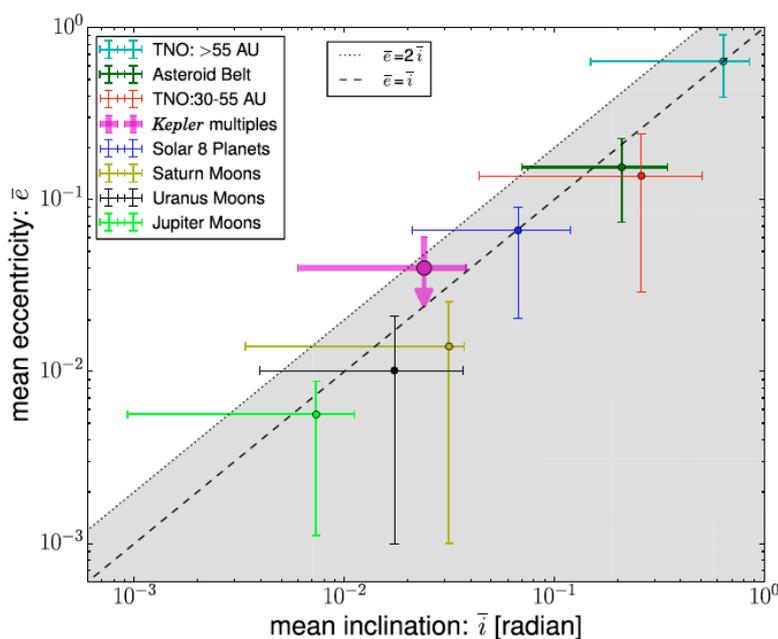


图 7 平均轨道倾角和偏心率符合一个简单的线性关系. Kepler探测到的系外行星和太阳系中的各种天体都很好地符合这个规律. 图片来源于参考文献[52].

Fig. 7 Linear relation between mean orbital inclination and eccentricity. The Kepler planets and various solar system objects obey such a relation. Figure adopted from reference [52].

再来看看轨道倾角的第2层意思, 即行星轨道面与恒星自转面的夹角. 太阳系里, 这个夹角大概为 7° , 依然是一个近共面的构型. 对系外行星系统, 行星轨道面与恒星自转面夹角的测量主要依赖凌星法观测, 最主要的方法是: (1)测量凌星时的Rossiter-McLaughlin效应^[61-62]; (2)测量凌星系统主星的 $V\sin i$, 再通过自转分离出 V 和 $\sin i$ ^[63]; (3)分析恒星黑子引起的光变方法^[64-65]; (4)星震模式分析方法^[66]; (5)引力致暗效应(Gravity-Darkening)^[67]. 综合以上方法的测量结果, 研究发现系外行星系统的这个夹角的分布呈多样化: 既发现了像太阳系的这种近共面的构型^[68], 也发现了很多夹角很大的倾斜构型^[69], 甚至还发现一些倾角接近和大于 90° 的垂直和反转构型^[70-71]. 统计发现倾角的大小和恒星表面温度有一定的联系: 一般高倾斜构型的系统恒星的表面温度都大于 6100 K ^[72]. 这可能是因为恒星的温度和恒星内部结构有关, 从而影响恒星和行星之间的潮汐力导致轨道构型的差异. 另一个特征就是单凌星系统中的这个倾角一般高于多凌星系统的倾角^[73]. 产生以上分布特征的理论解释有潮汐模型、行星散射模型、长期摄动模型等^[74], 目前尚无学界公认的理论. 相关研究是行星领域的一个热门话题. 不过需要特别注意的是, 目前这个倾角的样本中绝大多数行星都是周期非常短的巨行星. 要进一步了解问题的答案需要有更多包含周期长、质量或半径较小的行星(特别是包含超级地球和亚海王星)系统的测量.

3 超级地球和亚海王星的形成起源

解释和理解行星的形成和演化是行星科学中的最重要问题之一. 尽管人们花了几百年去思考如何解释我们太阳系行星系统的形成和演化, 但是问题并未完全解决. 而随着近些年来大量超级地球和亚海王星的发现, 行星形成和演化的图像又进一步复杂和模糊起来了. 这些太阳系中不曾发现的行星给原本基于太阳系建立起来的行星形成演化理论带来了挑战, 同时也注入了新的元素. 为了解释超级地球和亚海王星的存在, 研究者们提出了很多理论模型. 以下我们就这些模型做一简单的介绍和讨论.

3.1 当地形成(in-situ model)

所谓当地形成就是指, 像太阳系中的类地行星一样, 探测到的超级地球和亚海王星是在目前观测到的位置附近形成的. 形成的过程主要是通过原行星盘中的尘埃颗粒不断碰撞聚合成星子, 然后星子聚合成行星胚胎, 最后行星胚胎再碰撞聚合成行星. 当地形成模型是一个很自然的太阳系类地行星形成模型的推广, 能解释很多观测特征, 比如超级地球的轨道偏心率、倾角和间距的分布等^[32]. 但是, 当地形成模型也面临着一些问题. 首先是形成当地的固体质量问题. 要在距离恒星 0.1 au 的附近形成几个地球质量的行星, 需要10倍以上形成太阳系行星的盘质量^[32]. 这么一个大质量的盘能否普遍存在是个问题^[75]. 另外, 行星在距离恒星如此近的当地通过碰撞形成后往往密度较大, 缺乏水分, 而且也难形成较厚的大气. 这些特征和目前探测到的一些密度低、大气充分的亚海王星是相违背的^[76].

3.2 迁移形成(migration model)

迁移形成就是指超级地球或亚海王星是在远离宿主行星的地方先形成(如雪线以外), 然后轨道发生向内迁移, 最后停在了现在观测的、距离宿主恒星很近的位

置^[77-79](如图8所示). 迁移模型的后期, 即行星都迁移到最后的位置时, 其实是一个类似当地形成模型的过程. 因此, 迁移模型也能重现出当地模型解释得很好的轨道特征, 如偏心率、倾角和间距的分布等. 此外, 由于行星是从面迁移进来的, 因此迁移模型避免了当地模型的固体质量问题, 同时迁移模型中的行星的密度也要更低, 带有更多的水分和大气. 这些和现在的观测, 似乎更加贴切一些. 但是迁移模型的困难在于它引入了更多的模型参数和不确定性. 比如: 行星在哪里形成、初始质量如何、如何形成、何时发生迁移、在哪停止迁移和如何停止迁移等.

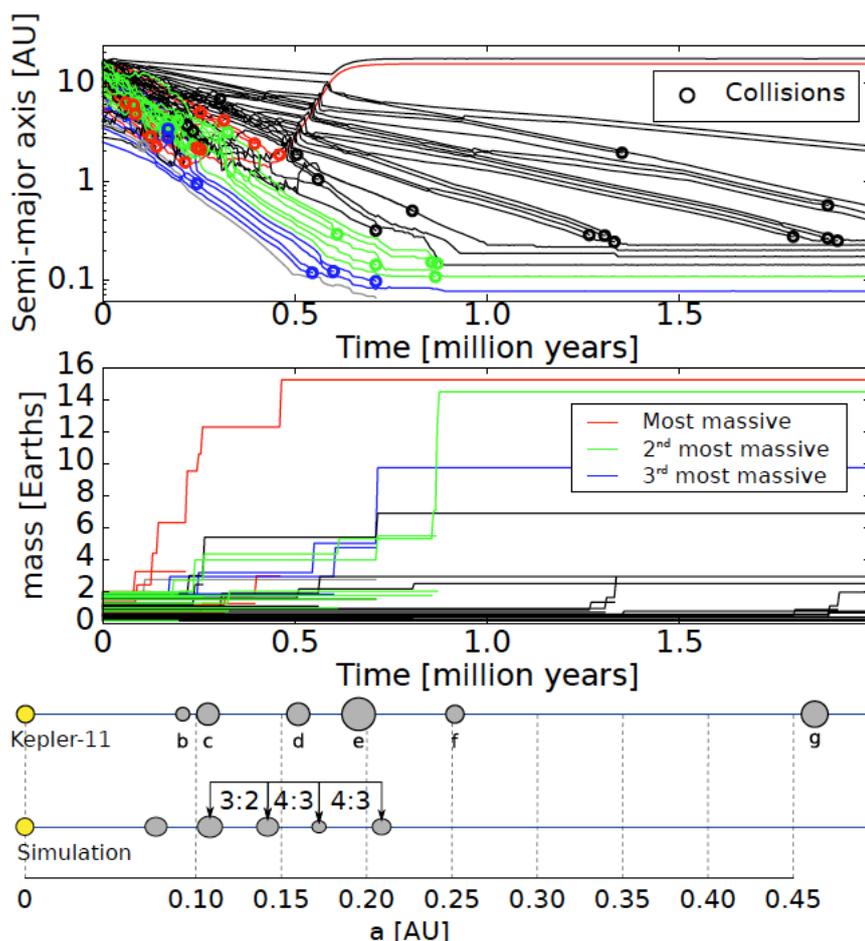


图 8 轨道迁移机制形成超级地球和亚海王星系统(图片来源于参考文献[77])

Fig. 8 Forming super-Earths and sub-Neptunes via migration mechanism (Figure adopted from reference [77])

3.3 其他模型

除了以上两种主要的模型外, 还有巨行星的迁移共振俘获模型^[80-81]、长期共振迁移俘获机制^[82]、高偏心轨道潮汐圆化以及光致蒸发气巨行星等机制. 这些机制虽然可能在解释个别系统是较为成功的, 但是与大部分的超级地球与亚海王星的观测事实是不

一致的. 比如, 有研究发现其实光致蒸发气巨行星机制的效率非常低^[83]. 巨行星共振和长期共振迁移俘获机制, 需要有巨行星的存在, 但是观测发现大部分超级地球和亚海王星并不依赖巨行星的存在. 高偏心率轨道圆化机制可以形成靠主星很近的超级地球和亚海王星, 但是它的推论认为很难存在多行星系统—这个和大部分超级地球或亚海王星存在于多行星系统中的观测事实是相违背的. 因此, 这些模型只能作为主流模型的补充, 用于解释某些特殊系统.

由此, 我们可以看出, 关于超级地球和亚海王星的起源还是一个相当开放的问题. 虽然目前的主导模型已经基本划为当地形成和迁移形成两种, 但是并不排除随着新的观测会出现新的、更好的理论模型. 此外进一步区分或者理解当地形成和迁移形成机制需要更多观测上的线索. 一个很重要的线索来源于行星本身的结构组成, 因为它往往能反映行星是在哪形成的. 但是行星质量和半径在测量上的困难及误差导致我们在这方面(既知道轨道特征又对内部结构有一定了解)只有一个很小的样本. 未来系外行星观测的一个重点就是扩大这个样本. 此外, 从现有数据中挖掘新的观测线索也是十分必要的.

4 展望

大量超级地球和亚海王星的发现可以说是意料之外的惊喜, 这个惊喜来源于探测技术的革新, 即视向速度探测方法迈入 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的精度和空间凌星探测的开展. 这个惊喜也鼓舞和吸引了更多科学工作者参与到系外行星研究中来, 同时更多地面和空间的系外行星探测项目也在紧锣密鼓的筹备当中(图9). 一些观测项目在地基望远镜上装备了新型视向速度测量仪器, 正计划着下一代系外行星的搜寻工作^[84–86], 并把目标指向了处在宜居带的类地行星. 同时一些升级后的地基凌星搜寻项目也把目标瞄准了更小的行星^[87–88]. 不管是视向速度还是凌星法, 更多的目标转移到了红矮星周围的行星. 这是因为红矮星在宇宙中的数目更多, 宜居带更靠近主星, 更容易探测到小的行星. 正在进行的Gaia太空卫星巡天^[89], 有望帮助测量系外行星的3维轨道构型. 2018年即将发射的TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)空间卫星, 将对全天的亮星进行凌星搜寻, 预计将能发现成百上千的超级地球和亚海王星系统^[90]. 由于TESS的目标都是近邻的亮星, 因此探测到的超级地球和亚海王星系统非常适合进行随后的视向速度观测从而测量出行星的质量, 藉此我们有望得到一个大的物理性质和轨道性质都较完备的行星样本. 而即将登场的JWST (James Webb Space Telescope)将能揭示一大批超级地球和亚海王星的大气结构和组成^[91]. 除这些之外, 还有2018年预计发射的CHEOPS (Characterising Exoplanets Satellite)卫星^[92]以及2024年计划发射的PLATO (Planetary Transits and Oscillations of stars)计划^[93]. 可以想象, 未来10 yr将会是系外行星继续大发展的10 yr, 不仅可以更深入地探索超级地球和亚海王星这些近几年崛起的行星新物种, 而且我们也有信心期待更多的惊喜.

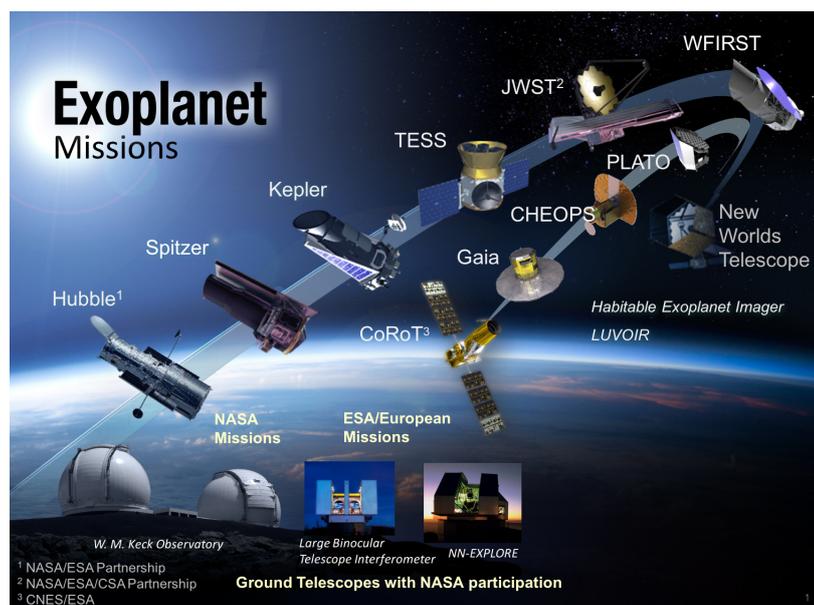


图 9 曾经、现在和将来的地面和太空探测系外行星项目(图片来源于<https://exoplanets.nasa.gov>)

Fig. 9 Past, present, and future exoplanet missions (Figure adopted from <https://exoplanets.nasa.gov>)

参 考 文 献

- [1] Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378: 355
- [2] Howard A W, Marcy G W, Bryson S T, et al. ApJS, 2012, 201: 15
- [3] Fressin F, Torres G, Charbonneau D, et al. ApJ, 2013, 766: 81
- [4] Gould A, Dorsher S, Gaudi B S, et al. AcA, 2006, 56: 1
- [5] Bayliss D D R, Sackett P D. ApJ, 2011, 743: 103
- [6] Wright J T, Marcy G W, Howard A W, et al. ApJ, 2012, 753: 160
- [7] Marcy G, Butler R P, Fischer D, et al. PThPS, 2005, 158: 24
- [8] Mayor M, Marmier M, Lovis C, et al. arXiv:1109.2497
- [9] Dong S, Zhu Z. ApJ, 2013, 778: 53
- [10] Fischer D A, Valenti J. ApJ, 2005, 622: 1102
- [11] Buchhave L A, Latham D W, Johansen A, et al. Nature, 2012, 486: 375
- [12] Wang J, Fischer D A. AJ, 2015, 149: 14
- [13] Zhu W, Wang J, Huang C. 2016, ApJ, 832: 196
- [14] Rogers L A. ApJ, 2015, 801: 41
- [15] Lopez E D, Fortney J J. ApJ, 2014, 792: 1
- [16] Wu Y, Lithwick Y. ApJ, 2013, 772: 74
- [17] Weiss L M, Marcy G W. ApJ, 2014, 783: L6
- [18] Jontof-Hutter D, Ford E B, Rowe J F, et al. ApJ, 2016, 820: 39
- [19] 田丰. 中国科学D辑, 2013, 43: 2099
- [20] 田丰, 胡雄, 吴季. 空间科学学报, 2016, 36: 815
- [21] 田丰. 科学通报, 2016, 61: 2093
- [22] 宋伟, 屈中权. 天文学报, 2016, 57: 165
- [23] Song W, Qu Z Q. ChA&A, 2017, 41: 235
- [24] 杨沫, 郭建恒. 天文学报, 2016, 57: 657
- [25] Batygin K, Laughlin G. PNAS, 2015, 112: 4214

- [26] Gould A, Dong S, Gaudi B S, et al. *ApJ*, 2010, 720: 1073
- [27] Suzuki D, Bennett D P, Sumi T, et al. *ApJ*, 2016, 833: 145
- [28] Spergel D, Gehrels N, Baltay C, et al. *arXiv:1503.03757*
- [29] Coughlin J L, Mullally F, Thompson S E, et al. *ApJS*, 2016, 224: 12
- [30] Figueira P, Marmier M, Boué G, et al. *A&A*, 2012, 541: 139
- [31] Lissauer J J, Ragozzine D, Fabrycky D C, et al. *ApJS*, 2011, 197: 8
- [32] Hansen B M S, Murray N. *ApJ*, 2013, 775: 53
- [33] Ballard S, Johnson J A. *arXiv:1410.4192*
- [34] Bovaird T, Lineweaver C H. *MNRAS*, 2013, 435: 1126
- [35] Huang C X, Bakos G Á. *MNRAS*, 2014, 442: 674
- [36] Fabrycky D C, Lissauer J J, Ragozzine D, et al. *ApJ*, 2014, 790: 146
- [37] Xie J W. *ApJ*, 2014, 786: 153
- [38] Petrovich C, Malhotra R, Tremaine S. *ApJ*, 2013, 770: 24
- [39] Izidoro A, Ogihara M, Raymond S N, et al. *arXiv:1703.03634*
- [40] Chatterjee S, Ford E B. *ApJ*, 2015, 803: 33
- [41] Lithwick Y, Wu Y. *ApJ*, 2012, 756: L11
- [42] Pu B, Wu Y. *ApJ*, 2015, 807: 44
- [43] Volk K, Gladman B. *ApJ*, 2015, 806: L26
- [44] Batalha N M, Rowe J F, Bryson S T, et al. *ApJS*, 2013, 204: 24
- [45] Wright J T, Fakhouri O, Marcy G W, et al. *PASP*, 2011, 123: 412
- [46] Anglada-Escudé G, López-Morales M, Chambers J E. *ApJ*, 2010, 709: 168
- [47] Shen Y, Turner E L. *ApJ*, 2008, 685: 553
- [48] Dawson R I, Johnson J A. *ApJ*, 2012, 756: 122
- [49] Lissauer J J, Fabrycky D C, Ford E B, et al. *Nature*, 2011, 470: 53
- [50] Hadden S, Lithwick Y. *ApJ*, 2014, 787: 80
- [51] Van Eylen V, Albrecht S. *ApJ*, 2015, 808: 126
- [52] Xie J W, Dong S, Zhu Z, et al. *PNAS*, 2016, 113: 11431
- [53] Ji J, Li G, Liu L. *ApJ*, 2002, 572: 1041
- [54] Rivera E J, Lissauer J J. *ApJ*, 2001, 558: 392
- [55] Rivera E J, Laughlin G, Butler R P, et al. *ApJ*, 2010, 719: 890
- [56] Hirano T, Narita N, Sato B, et al. *ApJ*, 2012, 759: L36
- [57] McArthur B E, Benedict G F, Barnes R, et al. *ApJ*, 2010, 715: 1203
- [58] Tremaine S, Dong S. *AJ*, 2012, 143: 94
- [59] Fang J, Margot J L. *ApJ*, 2012, 761: 92
- [60] Kokubo E. *Dynamics of Populations of Planetary Systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 41
- [61] Rossiter R A. *ApJ*, 1924, 60: 15
- [62] McLaughlin D B. *ApJ*, 1924, 60: 22
- [63] Hirano T, Sanchis-Ojeda R, Takeda Y, et al. *ApJ*, 2012, 756: 66
- [64] Sanchis-Ojeda R, Fabrycky D C, Winn J N, et al. *Nature*, 2012, 487: 449
- [65] Mazeh T, Perets H B, McQuillan A, et al. *ApJ*, 2015, 801: 3
- [66] Huber D, Carter J A, Barbieri M, et al. *Science*, 2013, 342: 331
- [67] Barnes J W. *ApJ*, 2009, 705: 683
- [68] Winn J N, Johnson J A, Marcy G W, et al. *ApJ*, 2006, 653: L69
- [69] Winn J N, Johnson J A, Fabrycky D, et al. *ApJ*, 2009, 700: 302
- [70] Albrecht S, Winn J N, Butler R P, et al. *ApJ*, 2012, 744: 189
- [71] TriAUD A H M J, Collier Cameron A, Queloz D, et al. *A&A*, 2010, 524: 25
- [72] Winn J N, Fabrycky D, Albrecht S, et al. *ApJ*, 2010, 718: L145
- [73] Morton T D, Winn J. *ApJ*, 2014, 796: 47
- [74] Winn J N, Fabrycky D C. *ARA&A*, 2015, 53: 409

- [75] Chiang E, Laughlin G. *MNRAS*, 2013, 431: 3444
- [76] Raymond S N, Cossou C. *MNRAS*, 2014, 440: L11
- [77] Raymond S N, Kokubo E, Morbidelli A, et al. *Protostars and Planets VI*. Tucson: University of Arizona Press, 2014: 595
- [78] Terquem C, Papaloizou J C B. *ApJ*, 2007, 654: 1110
- [79] Cossou C, Raymond S N, Hersant F, et al. *A&A*, 2014, 569: 56
- [80] Zhou J L, Aarseth S J, Lin D N C, et al. *ApJ*, 2005, 631: L85
- [81] Raymond S N, Mandell A M, Sigurdsson S. *Science*, 2006, 313: 1413
- [82] Raymond S N, Barnes R, Mandell A M. *MNRAS*, 2008, 384: 663
- [83] Tian F, Toon O B, Pavlov A A, et al. *ApJ*, 2005, 621: 1049
- [84] Pepe F A, Cristiani S, Rebolo Lopez R, et al. *Proceedings of the SPIE*, 2010, 7735: 77350F
- [85] Szentgyorgyi A, Frebel A, Furesz G, et al. *Proceedings of the SPIE*, 2012, 8446: 84461H
- [86] Pasquini L, Avila G, Dekker H, et al. *Proceedings of the SPIE*, 2008, 7014: 70141I
- [87] Bakos G Á, Csubry Z, Penev K, et al. *PASP*, 2013, 125: 154
- [88] Wheatley P J, Pollacco D L, Queloz D, et al. *European Physical Journal Web of Conferences*, 2013, 47: 13002
- [89] Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al. *A&A*, 2016, 595: 1
- [90] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. *JATIS*, 2015, 1: 014003
- [91] Batalha N E, Line M R. *arXiv:1612.02085*
- [92] Broeg C, Fortier A, Ehrenreich D, et al. *European Physical Journal Web of Conferences*, 2013, 47: 03005
- [93] Rauer H, Catala C, Aerts C, et al. *ExA*, 2014, 38: 249

The Rise of New Planets: Super-Earths and Sub-Neptunes

XIE Ji-wei^{1,2}

(1 School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023)
(2 Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics, Ministry of Education, Nanjing 210023)

ABSTRACT With the ceaseless progress of detecting technology, over 3500 exoplanets have been discovered. It is interesting but unexpected that the majority of the detected exoplanets are unlike any planet in our solar system. They have sizes and masses between the Earth and Neptune, and thus called Super-Earths or Sub-Neptunes. In this article, I introduce these newly rising planets and review our current knowledge of their physical properties, orbital properties, and origins. Finally, I discuss the promising and exciting prospects.

Key words planets and satellites: detection, planets and satellites: formation