飞马座 51b: 引领太阳系外行星研究领域变革的行星

马波*, 余聪*

中山大学物理与天文学院, 珠海 519082

* 联系人, E-mail: mabo8@mail.sysu.edu.cn; yucong@mail.sysu.edu.cn

飞马座 51b 是第一颗被证实的围绕类太阳恒星运转的太阳系外行星. 它的发现开创了一个新的天文学研究领域. 经过 25 年的发展, 太阳系外行星研究在国际上已经成为天文学的一个重要分支, 各个国家都在此研究领域投入了大量的资源. 我们在这里简要介绍飞马座 51b 的发现历史, 以及此发现激起的行星形成理论和行星探测领域的变革.

1 第一颗太阳系外行星飞马座 51b 的发现

1995 年 10 月 6 日, Mayor 和 Queloz^[1]在 *Nature* 杂志发表论文, 宣告了飞马座 51b 的发现, 改变了人类对自身在宇宙中位置的认识, 让人类初步认识到地球和太阳系在宇宙中并不是独一无二的, 并因此被授予了 2019 年度诺贝尔物理学奖. 飞马座 51b (51 Pegasi b, 51 Peg b) 是一颗位于飞马座、距离地球约 50.9 光年的太阳系外行星 (extrasolar planet, exoplanet). 它是人类发现的第一颗围绕类似太阳的恒星运转且被证实的系外行星. 该行星的质量约是木星的一半, 体积约是木星的 2 倍, 轨道周期大约为 4 个地球日, 表面温度约 1000°C.

在此发现之前, 日内瓦大学 (University of Geneva) 天文系的 Mayor 教授常年利用多普勒视向速度法从事双星系统的天文科学研究. 他们使用天文望远镜和高分辨率光谱仪收集恒星的光谱数据, 利用恒星谱线的多普勒效应探测恒星视向速度的变化, 此方法被称为视向速度法. 两颗恒星的视向速度会因为相互的万有引力扰动产生周期性的变化. 同样的道理, 一颗恒星与一颗行星放到一起, 相互的万有引力扰动也会造成恒星视向速度周期性变化, 只不过因为行星质量比恒星小上千倍, 因此其中恒星视向速度的变化幅度要比双星系统中恒星视向速度的变化幅度小上千倍, 极其不易被探测到.

利用视向速度法探测系外行星, 在可查的文献中最早是由 Struve 教授^[2]于 1952 年提出的. 但是, 由于探测仪器精度上的限制, 一直未能成功. 1990 年初, Mayor 教授发现法国上普罗旺斯天文台 (Haute-Provence Observatory) 的望远镜没有合适的亮月夜观测目标, 便提议建造一台高分辨率光谱仪 (名为 ELODIE) 放到天文台, 使用视向速度法搜寻围绕明亮恒星运转的系外行星. 作为 Mayor 博士生的 Queloz 在该天文台度过了他大部分的博士研究生涯, 负责

马波 中山大学物理与天文学院副教授. 本科毕业于南京大学天文系, 2015 年于美国佛罗里达大学天文系获得博士学位. 主要研究方向是太阳系外行星探测、高分辨率光谱仪的研发使用和高能天体物理.

余聪 中山大学物理与天文学院教授. 本科毕业于云南大学物理系, 2005 年于中国科学院云南天文台获得博士学位. 主要研究方向是天体物理中的流体和磁流体动力学过程研究.

做仪器测试和观测数据处理. Mayor 和 Queloz^[1]使用 ELODIE 得到了好于 10 m/s 的视向速度精度, 并于 1995 年发现了飞马座 51b (图 1).

当 Mayor 和 Queloz 在 1995 年向全世界公布了飞马座 51b 这个重大发现之后, 由于这个行星系统的构型过于奇异, 以及此前学界有不少错误的系外行星发现, 大部分天文同行都怀疑此结果的真实性. 但是, 他们的竞争对手——美国加州大学的 Marcy 研究小组在 1995 年 10 月只花了 4 个晚上的天文望远镜观测时间, 就证实了飞马座 51b 的存在, 宣告了系外行星研究这一新的天文学研究领域的诞生. 这一奇特发现也很好体现了科学研究的魅力所在, 每隔几年, 总会出现一些不符合“标准模型”的新结果.

2 飞马座 51b 的构型特征

与太阳系内的行星相比, 大多数系外行星系统都是异类. 由于质量与木星类似, 轨道周期短, 距离宿主恒星近, 表面温度高, 因此飞马座 51b 被归类为“热木星”, 也是“热

图 1 飞马座 51b 的视向速度图. 点代表飞马座 51 的视向速度观测数据, 实线是观测数据的最佳开普勒运动速度拟合曲线. 图片授权来自 Springer Nature^[1]

Figure 1 Radial velocity curve of 51 Peg b. Points are radial velocity data of 51 Peg, and the solid line represents the best fit Keplerian orbital motion. Reprinted by permission from Springer Nature^[1]

木星”的原型星. 截至 2020 年 8 月, 约有 300 颗“热木星”被发现(数据来源: exoplanets.org).

飞马座 51b 的轨道周期约为 4 个地球日, 其轨道与中心宿主恒星的距离比水星与太阳的距离近得多. 一颗如此靠近其宿主恒星的类木巨行星的存在与当时盛行的行星形成理论相矛盾, 因此被认为是一种异常现象. 传统的行星形成理论认为, 要形成大质量的巨行星, 需要低温的气体 and 尘埃, 因此巨行星理应在恒星系统的“雪线”(snow line)之外形成. 这里的“雪线”是指原行星盘上易挥发物质(如水)的挥发交界面. “雪线”的位置主要由原行星盘的温度决定, 在其附近, 固态颗粒面密度的增强可促进星子的形成, 进而使星子加速生长最终形成气态巨行星. Mayor 和 Queloz 提出了两种可能解释飞马座 51b 这种奇异轨道构型的理论: 一是飞马座 51b 是被吹掉外包层, 损失了大部分质量的褐矮星的内核; 二是飞马座 51b 的初始形成位置与其最终被发现时所处的位置不同.

在飞马座 51b 之后, 又有数量众多的“热木星”(如巨蟹座 55b)被发现, 迫使天文学家开始系统地研究系外行星的轨道迁移现象, 并尝试修改当时流行的行星形成理论. 目前比较流行的“热木星”形成理论认为, “热木星”初始时刻在远离中心宿主恒星的轨道上形成, 之后通过某种迁移机制迁移到了距离宿主恒星很近的轨道上. 关于轨道迁移的理论机制又分为盘迁移理论和高偏心率迁移理论两种^[3-8].

盘迁移理论认为, 巨行星与原行星盘至今存在相互作用, 使巨行星向内缓慢迁移, 最终变成“热木星”. 由于这种迁移方式比较温和, 最终形成的“热木星”轨道偏心率几

乎为零, 轨道轴与恒星自转轴夹角很小. 高偏心率迁移方式则认为, 行星与其他天体(包括系统中的其他行星和恒星)的引力摄动使其获得高偏心率轨道, 之后恒星与行星之间的潮汐作用使得行星轨道向内迁移, 最终形成“热木星”. 这种迁移方式比较剧烈, 最终形成的“热木星”有着较高的偏心率, 且行星轨道轴与恒星自转轴有明显的夹角. 目前人们观测到的“热木星”既有近圆轨道, 又有高偏心率轨道, 行星轨道轴和恒星自转轴之间的夹角也是大小均有. 这些观测证据表明, 这两种迁移方式很可能同时存在.

之后的研究发现, “热木星”的存在比例其实相当稀少(每 200 颗类太阳恒星周围只有一颗左右的“热木星”), 因此“热木星”的存在其实并没有颠覆太阳系行星系统构型作为标准行星系统构型的地位. 然而, 最近美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的 Kepler 系外行星探测望远镜发现了大批太阳系内并不存在的短轨道周期的“超级地球”(大小介于地球和海王星之间的行星, 轨道周期在几十个地球日). 几乎每两颗类太阳恒星周围就有一颗这样的“超级地球”^[9-11], 以致于科学同行都开始质疑, 是不是我们自己所处的太阳系才是行星系统中的异类?

3 飞马座 51b 在系外行星研究历史上的地位

尽管在飞马座 51b 被发现之前, 天文学家就已经证实了太阳系外行星的存在^[12], 但是作为首颗被证实的围绕类太阳恒星运转的系外行星, 飞马座 51b 大大改变了我们对行星系统形成方式的认识, 并且拉开了系外行星探索黄金时代的序幕. 在这里, 有必要介绍一下与 Mayor 研究小组处于竞争关系的美国加州大学(University of California)的 Marcy 研究小组. Marcy 小组更早开始从事系外行星探测的研究, 并且有灵敏度更高的探测仪器, 但是没有成功发现第一颗系外行星. 根据当事人事后的分析, 主要原因有两个: 一是搜寻策略的选择问题. 当时 Marcy 小组正在努力寻找类似太阳系中存在的周期为 12 年的木星系统, 而忽视了极短轨道周期上(例如几个地球日)可能存在类木行星系统的可能性. 在 Mayor 和 Queloz 发现飞马座 51b 之后, Marcy 小组利用自己的仪器, 只花了一周时间就重新“发现”和确认了这颗行星的存在, 足见他们的仪器精度、观测手段和数据处理方法都没有问题. 二是由于当时的科学界认为寻找太阳系外行星属于过于怪异和科幻的研究课题, 同时由于长期没有研究成果发表, 因此 Marcy 小组得不到美国自然科学基金的资助. 没有科研经费, 小组便无法购买先进的计算机来做数据处理, 导致大批的观测数据躺在数据磁带上, 没有机会处理. 在飞马座 51b 被发现之后, 美国开始投入大量经费给 Marcy 小组. 在之后的几年, Marcy 小组陆续从躺在服务器上的数据中发现了多颗系外行星, 并且在与 Mayor 研究小组的竞争中开始占据上风.

飞马座 51b 的发现引领和开创了一个新的行星研究的黄金时代。在此之后,随着越来越多天文学家的加入,以及新的地面和空间搜寻项目(如 HARPS、HATNet、Super-WASP、Kepler 和 TESS)的开启^[13,14],每年都有新的系外行星系统被发现。目前,探测系外行星的主要技术方法有视向速度法、凌星法、微引力透镜法和直接成像法,其中视向速度法和凌星法成果最丰富。未来随着技术的发展,微引力透镜法和直接成像法有望迎头赶上。新发现的系外行星数目从最初的每年几颗增加到近几年的每年几百颗(图2)。截至 2020 年 8 月底,人们已经发现并证认了超过 4200 颗系外行星。如果将现有的系外行星画在同一个轨道半长径-质量分布图上(图3),可以看到,目前发现的系外行星主要分为三大族群:“热木星”、“冷木星”和“超级地球”。飞马座 51b 属于“热木星”族群,与太阳系内存在的木星大不相同。

4 结语

作为系外行星研究领域最为重要的观测成果,飞马座 51b 的发现有以下几方面的重要意义。

(1) 开创了一个新的天文学研究领域。太阳系外行星研究,一个 25 年前还不存在的天文学科方向,从无到有,已经成长为天文学一个重要的研究分支。世界各国都投入了越来越多的人力、物力到这个研究领域。美国、欧洲国家与中国都计划发射空间望远镜项目做太阳系外行星研究,包括美国的 JWST 和 WFIRST,欧洲的 CHEOPS、PLATO 和 ARIEL,中国的空间站巡天望远镜等,凸显了系外行星研究在天文学研究领域中越来越重要的地位。我国中国科学院各大天文台以及有天文系的高等院校,如南京大学、清华大学、北京大学、中山大学、上海交通大学等,都在加紧建设系外行星这一学科方向,并且对这一领域作出过重要科学贡献,如国家天文台学者发现的系外巨行星^[15],以及我国在南极发现的上百颗系外行星候选体^[16]。

(2) 改变了人类对行星系统如何形成的认知。在飞马座 51b 之前,天文学家认为,如果宇宙中存在其他的行星系统,它们的构型都将与太阳系类似。飞马座 51b 的出现揭示了传统行星形成理论的缺陷,新的理论不断出现。随着几千颗系外行星的发现,行星系统形成理论修改得越来越完善,关于太阳系行星系统在宇宙中是否独一无二的争论也越来越多。

(3) 使发现系外星球上的生命特征变为可能。以前只存在于科幻小说中的情节和内容正在慢慢变为可能,越来越多的天文学家,尤其是天体生物学家在探索如何使用天

文望远镜从类地系外行星的大气光谱中寻找外星生命的痕迹。美国航空航天局在过去 10 年资助成立了若干天体生物学研究中心,任务就是寻找外星上的生命特征。我国在这方面的研究才刚刚起步,尚没有大的专门从事此方面研究的机构成立,亟需加大资助和投入力度。

图2 (网络版彩色)每年探测发现的太阳系外行星数目统计。图片来自 NASA

Figure 2 (Color online) Number of exoplanets detected per year. This figure is from NASA

图3 (网络版彩色)已知系外行星的轨道半长径-行星质量分布图。数据来源: <http://exoplanets.org>

Figure 3 (Color online) Orbital separation-mass diagram of known exoplanets. Data from <http://exoplanets.org>

致谢 感谢国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金(U1931102)、国家自然科学基金(11521303, 11733010, 11873103, 12073092)、广州市基础与应用基础研究项目和中山大学中央高校基本科研业务费专项资金(201gpy169)资助。

推荐阅读文献

- 1 Mayor M, Queloz D. A jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355–359
- 2 Struve O. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work. *Observatory*, 1952, 72: 199–200
- 3 Howard A, Marcy G, Bryson S, et al. Planet occurrence within 0.25 AU of solar-type stars from Kepler. *Astrophys J Suppl Ser*, 2012, 201: 15
- 4 Zhu W. Influence of stellar metallicity on occurrence rates of planets and planetary systems. *Astrophys J*, 2019, 87: 8
- 5 Yang J, Xie J, Zhou J. Occurrence and architecture of Kepler planetary systems as functions of stellar mass and effective temperature. *Astron J*, 2020, 159: 164
- 6 Latham D, Mazeh T, Stefanik R, et al. The unseen companion of HD114762: A probable brown dwarf. *Nature*, 1989, 339: 38–40
- 7 Mayor M, Pepe F, Queloz D, et al. Setting new standards with HARPS. *ESO Messenger*, 2003, 114: 20
- 8 Borucki W, Koch D G, Basri G, et al. Kepler planet-detection mission: Introduction and first results. *Science*, 2010, 327: 977–980
- 9 Lin D, Bodenheimer P, Richardson D. Orbital migration of the planetary companion of 51 Pegasi to its present location. *Nature*, 1996, 380: 606
- 10 Ida S, Lin D. Toward a deterministic model of planetary formation. IV. Effects of type I migration. *Astrophys J*, 2008, 673: 487
- 11 Ford E B, Rasio F A. On the relation between hot jupiters and the Roche limit. *Astrophys J*, 2006, 638: L45–L48
- 12 Chatterjee S, Ford E B, Matsumura S, et al. Dynamical outcomes of planet-planet scattering. *Astrophys J*, 2008, 686: 580
- 13 Wu Y, Lithwick Y. Secular chaos and the production of hot jupiters. *Astrophys J*, 2011, 735: 109
- 14 Xu W, Lai D. Disruption of planetary orbits through evection resonance with an external companion: Circumbinary planets and multiplanet systems. *Mon Not of Roy Astron Soc*, 2016, 459: 2925
- 15 Liu Y, Sato B, Zhao G, et al. A planetary companion orbiting the intermediate-mass G Giant HD 173416. *Res Astron Astrophys*, 2009, 9: 1–4
- 16 Zhang H, Yu Z, Liang E, et al. Exoplanets in the antarctic sky. II. 116 Transiting exoplanet candidates found by AST3-II (CHESPA) within the southern CVZ of TESS. *Astrophys J Suppl Ser*, 2019, 240: 17

Summary for “飞马座 51b: 引领太阳系外行星研究领域变革的行星”

51 Pegasi b: The planet that started the revolution of exoplanet research

Bo Ma^{*} & Cong Yu^{*}

School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

^{*} Corresponding authors, E-mail: mabo8@mail.sysu.edu.cn; yucong@mail.sysu.edu.cn

To celebrate its 150 anniversary, *Nature* collected 10 extraordinary papers published on *Nature* in November, 2019. One of the papers is on the discovery of the 51 Peg b by Swiss astronomers Michel Mayor and Didier Queloz from University of Geneva. 51 Peg b was the first confirmed planet around a solar-type star other than our own Sun. Mayor and Queloz later won the Nobel Physics Prize in 2019 because they have “explored our cosmic neighbourhoods on the hunt for unknown planets. Their discoveries have forever changed our conceptions of the world.”

The discovery was made using the radial velocity technique. A star and a planet orbit each other, and although not much, the star still shows a noticeable wobble due to the gravitational tug of the planet. By observing this wobble motion, scientists can infer the existence of a planet around the star and calculate its mass and distance from the host star. Mayor and Queloz started their planet survey using ELODIE spectrograph in the early 1990s at Haute-Provence Observatory. Through their survey, they found a strange object orbiting the star 51 Pegasi, with a similar mass of Jupiter, but about 7 times closer to its host star than Mercury is to our sun. This object was later named as 51 Pegasi b, and confirmed by other research teams around the world, including Marcy’s research team from America. This new discovery was a big challenge to the traditional models of planet formation. How could a Jupiter-like planet form so close to its host star? Revised planet formation theory suggests 51 Peg b initially formed like a Jupiter farther away from 51 Pegasi, and later migrated inwards towards the star due to interaction with other planets or interaction with the material in the gaseous planetary disk.

Since the discovery of 51 Peg b, more than 4200 exoplanets have been confirmed so far, and many more yet coming. The main detection methods of exoplanets are radial velocity technique, transiting technique, microlensing, and direct imaging methods. Most of the planets known today are detected using radial velocity technique and transiting technique. A lot of these planet systems are quite different from our Solar system, which makes people wondering, is our Solar system unique in the Universe? As more and more planets are detected, astronomers keep revising the theory of planet formation to account for the new discoveries. Eventually we will figure out the position of our own solar system in the Universe, and how planets form.

In the present paper, we will first briefly review the discovery of the first confirmed exoplanet around a solar-type star, 51 Peg b by Mayor and Queloz in 1995. Then, we introduce the properties of this extraordinary planet system, and show how this planet system single handily changed our view of planet formation. We shall also introduce the impact of this discovery on the exoplanet community and astronomy community as a whole. In the end, we point out the important implications of the discovery of 51 Peg b.

exoplanet, hot Jupiter, radial velocity technique, spectrograph

doi: 10.1360/TB-2020-0961