

走近天文之四

太阳系——熟悉又陌生的家园

施 韡

(上海科技馆 上海 200127)

2020-06-04收到

DOI: 10.7693/wl20200609

如果说地球是人类的摇篮,那么太阳系就是人类的家园。然而,虽然人类文明已经发展了几千年,我们对自己的家园是否真正了解呢?

1 何为“太阳系”?

什么是太阳系?从定义上讲是“由太阳和围绕它运动的天体构成的体系及其所占有的空间区域”^[1],用通俗的话讲起来就是由“太阳主宰的区域”。

人类很早就已经认识到头顶的这片星空。5000多年前苏美尔人已经将群星划分星座,2300多年前战国诗人写下“天何所沓?十二焉分?日月安属?列星安陈?”^[2]的不朽诗篇。人们还从简单的现象中寻找规律,继而引发一轮又一轮的思考,最终描绘出宇宙万物的运行机制。

在望远镜诞生前,我们只能依靠肉眼观察,南北半球的星星加在一起,总共只能看到6千多颗星

——没错,确实是数得清的。由于眼睛的分辨率有限,我们认为绝大多数星星在天上的相互位置是固定不变的,所以在中国它们被称为“恒星”。这里的“恒”字有两层含义,一是指星星的位置几乎不变,二是指它们似乎是永恒的,朝代更替、岁月沧桑,它们从未消失过。在西方,也有相同的发现,他们认为这些星星是被镶嵌在一个天球背景上的。当然现在我们已经知道,恒星是能通过核聚变反应产生能源,发出电磁波的天体,它们与太阳是同一类天体,只不过距离十分遥远罢了。

不过,满天的繁星中,却有那么几颗显得有些“调皮”。它们的位置经常发生变化,有时走得快,有时走得慢,有时自西向东运行,有时则反过来。中国古人将它们称为“行星”,并根据它们的颜色或运行规律分别命名为辰星、太白、荧惑、岁星和镇星,也就是现在我们所熟知的水星、金星、火星、木星和土星。同样,古希腊人对它们也不会置之不理,而是将它们连同地球、太阳、月亮一起构成了一个完整的系统,并且从“上帝视角”来解释它们的运动状态。古希腊米利都学派认为所有星辰都围绕地球运行,这是符合地球上看到的直观感受的。后来欧多克斯、亚里士多德等人对该理论进行了完善,最终由集大成者托勒密发展成为“地心说”。

“地心说”统治了大约1200年,直到16世纪,波兰天文学家哥白尼发表《天体运行论》,“日心说”登上历史舞台。1609年,伽利略第一次将望远镜对准了天上的星星,发现了环绕木星运动的4个卫星,发现了金星的相位变化,为“日心说”提供了重要的佐证。又经过第谷、开普勒等人的观察与研究,人们才终于接受了“太阳是宇宙的中心”这一观点。此时此刻,才算是有了“太阳系”这个概念(图1)。

2 成员多几何?

从“地心说”到“日心说”,虽说仅仅一字之差,但这是了不起的成就,标志着人类的宇宙观发生了翻天覆地的变化。

太阳是太阳系中唯一的恒星,是太阳系唯一的能量来源,自然也是整个太阳系绝对的主宰。太阳的直径约为140万千米,是地球的109倍,质量近 2.0×10^{30} 千克,是地球的33万倍,占据整个太阳系总质量的99.86%。至于太阳引力所控制的范围究竟有多大,现在仍然难以确定,估计至少有1光年。

太阳系是一个精彩纷呈的世界。行星、卫星、小行星、彗星、柯伊伯天体……数以亿计的天体在围绕太阳旋转,共同组成了一个大家庭。在望远镜被发明以前,我们所知道的不过1个太阳带着6个行星和1个月亮。直到伽利略告诉我

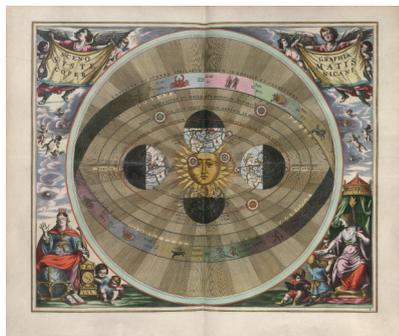


图1 日心说示意图(来源:安德烈亚斯·塞拉里乌斯《和谐大宇宙》)

们，原来还有肉眼看不见的星星。于是乎，我们也不难想象，当1781年英国天文学家威廉·赫歇尔在自己家后院用自制的望远镜发现了天王星，导致几千年来行星数量第一次发生变化，全世界是何等震惊。此后太阳系的版图不断扩张，天体数量不断增加，随着开普勒行星运动定律和牛顿万有引力定律对太阳系行星运动做出了准确的描述，哥白尼与托勒密的模型一同退出了历史舞台。

今天，根据国际天文学联合会的定义，太阳系拥有八大行星(图2)，其中内侧4个即水星、金星、地球和火星体型较小，拥有固态表面，被称为岩石行星或固态行星，外侧的木星、土星、天王星和海王星体型巨大，没有固态表面，被称为气态行星。这种现象是必然还是偶然呢？有理论认为，形成太阳系的原始星云盘上99%的质量位于中心，它们不断坍缩，温度和密度不断升高，最终点燃核聚变，形成太阳。与此同时，盘面上仍分布着大量的气体和尘埃，在特定的位置上也形成了质量相对较小的团块，它们逐渐形成行星。当太阳形成后一千万年左右，太阳风将气体和尘埃向外推开，距离太阳较近的行星便停止了生长，更远的行星还有条件继续吸积周围物质成长得更大些。固态物质相比于气态更易受引力吸引而凝聚，因此，距离太阳较近的范围容易形成岩石行星。当远至一定程度时，低温环境令氢、氦、水、甲烷等物质发生凝结，这种情况类似地球上海拔到达一定高度，空气中的水气会凝结成雪，这一界线被称为“雪线”。于是，在雪线之外，气体得到凝聚，最终形成了木星、土星、天王星和海王星。不过，它们之间还有些许差异。木星

和土星主要由氢和氦组成，从外而内因压力增加逐渐过渡到金属氢，因此严格来说它们并不完全是“气态行星”，可称为“气态行星”；而天王星和海王星在氢、氦大气之下的主要成分是在高压下以特殊形态存在的水、甲烷、氨等，因此现在学术界也把它们称作冰巨星。然而，在太阳系以外，我们发现了不少离恒星很近，但质量甚至超过木星的所谓“热木星”，似乎暗示了行星的形成及演化远没有我们想象的那样简单。

太阳系的行星还伴有为数众多的卫星。除了水星和金星，其他行星都有自己的卫星。截至2019年10月，已发现的卫星总数达到了205个，地球只有1个，火星有2个，气态行星拥有的卫星数十分可观，目前占据“头把交椅”的是土星，多达82颗^[3]，一举超越了土星的79颗。此外，冥王星、阋神星、妊神星、鸟神星等4个矮行星总共拥有9颗卫星^[4]。令人惊奇的是，就连小行星也有可能拥有自己的卫星，如小行星艾达(243 Ida)、香女星(45 Eugenia)等。

在火星与木星的轨道之间，有一条所谓的小行星带。早在17世纪初，开普勒就从“宇宙和谐”的观点出发，认为在火星与木星之间过于宽阔的地带中应当有一颗未被发

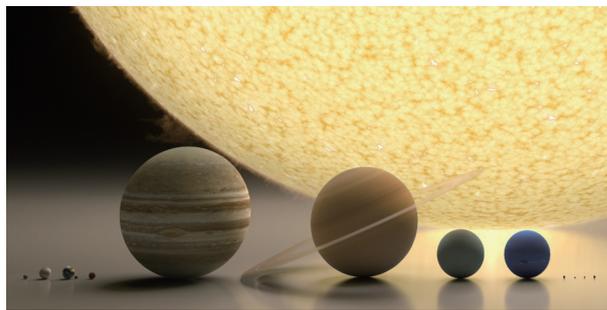


图2 等比例的太阳系(来源: Roberto Ziche)

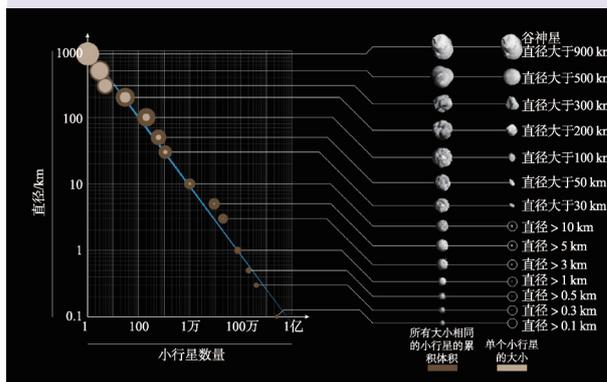


图3 小行星大小与数量的估算(来源: Marco Colombo, Density Design Research Lab)

现的行星^[5]。不过，事实是那里没有大行星，只有数不胜数的小行星。从1801年意大利天文学家皮亚齐发现谷神星(当时为第一颗小行星，现在被归类为矮行星)到1807年相继发现了4颗小行星，此后经历了38年的“空窗期”。正当人们以为太阳系的空白已经被填补时，小行星却如雨后春笋般不断涌现。随着观测技术的突飞猛进，几乎每个月都能发现几百颗小行星。目前，国际天文学联合会官方在册的小行星数量已有958878颗，其中545135颗获得了永久编号。这些数字中包含了我们非常关心的近地小行星22798颗，其中约2098颗对地球有着潜在危险^[6]。小行星的体型差异巨大，最大的小行星是灶神星，直径约520千米，最小的直径只有几米。据估算，直径1千米以上的小行星数量或许有几百万颗，体积

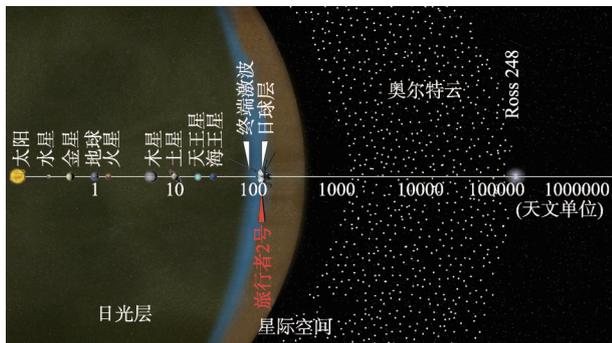


图4 “旅行者”2号的位置及太阳系范围示意图(来源: NASA)



图5 红色线条分别表示来自柯伊伯带和奥尔特云的彗星轨道(来源: ESO/L. Calçada)

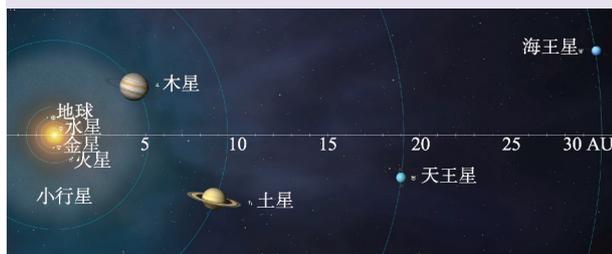


图6 太阳系行星按距离的真实比例排列(来源: X-Trails)

更小的恐怕真的称得上不计其数了,但是想发现它们实在是太困难了。不过,虽然多,但质量却很小,天文学家预计主带小行星的质量总和仅有月球的3%^[7](图3)。

3 疆域何其广?

太阳系到底有多大?边界在何方?事实上这是个极难回答的问题。在冥王星被“降级”前,我们一般把太阳系边界划到冥王星。而

现在,可以有这样几种做法:

第一种,以海王星的轨道半长径为界,约30.1天文单位(1天文单位为日地平均距离,约1.4960亿千米)。这个范围涵盖了几乎所有的行星、小行星、卫星,此范围以外的质量总和已经可以“忽略不计”。

第二种,以柯伊伯带为界,远至约50—70天文单位。柯伊伯是美籍荷兰裔天文学家,他与爱尔兰天文学家埃齐沃斯一同根据太阳系星云演化理论,提出海王星以外星云物质分布已经相当稀疏,不足以形成大行星,只能形成为数众多的小行星或彗星这样的小天体。果然,我们在海王星轨道以外发现了1300多个小行星,但是它们的分布范围、构成等与主带小行星存在明显差异,因而被称为柯伊伯天体,如今我们认为冥王星也属于其中一员。相比于火星与木星之间的小行星带,柯伊伯带更疏散、更宽广。海王星以内的天体,相互间轨道倾角最多不超过7°,而柯伊伯带天体的轨道倾角则达到了 $\pm 15^\circ$,至于柯伊伯带到底有多大,仍然是个未知数。

第三种,以太阳风粒子能到达的区域为界,最远可能为100—150天文单位。太阳在释放光的同时,也在源源不断地喷射出带电粒子,主要成分是质子和电子,这就是太阳风。研究认为,在距离太阳较近的地方,太阳风能轻易挣脱太阳的引力,几乎沿径向传播,而在远离太阳的地方显得“后劲不足”。太阳风会跟随太阳自转带动的引力场,沿着所谓“阿基米德螺线”向星际空间输送。当与星际物质不期而遇时,太阳风便迅速减弱,驻足不前,形成日球层。由于太阳正在以每秒263千米的速度绕银心旋转^[8],因此日球层并不是一个标准的球面,而是“前方”略有压缩,“后方”略有伸展。美国航天局热衷于这一概念,以此界定太阳系的范围。根据“旅行者”1号和“旅行者”2号发回的数据,来自太阳的带电粒子已经显著低于来自星际空间的带电粒子(宇宙射线)(图4),因此美国航天局宣布它们分别于2012年8月25日和2018年11月5日先后飞出太阳系^[9]。

第四种,奥尔特云,距离太阳远至大约5—20万天文单位,比日球层远得多。荷兰天文学家奥尔特和范沃尔康提出,最古老的彗星是由太阳系刚刚诞生时的残留物质形成的,它们分布在一个球形区域内,当受到临近恒星引力扰动时,这些彗星离开原来的位置,沿着一条抛物线轨道进入太阳系内部空间,如果受行星引力影响,轨道也可能变成椭圆或双曲线(图5)。奥尔特还认为这一结构中的彗星总量可能是1000亿颗,但是空间巨大,分布稀疏,再加上它们自身结构松散,密度很低,总质量或许还不到地球的1/10。很多已知彗星的表现一定程度上支持了他们的观点,

大多数天文学家相信这个“彗星仓库”确实存在，也认为将其作为太阳系边界才更合理。然而，奥尔特云究竟有多远、有多大，却依然是个谜。研究认为它的范围可以从5000天文单位延伸到50000天文单位(约0.79光年)^[10]，也有认为最远可达20万天文单位(约3.16光年)^[11]。

既然太阳系存在那么多天体，那么它会不会显得额外拥挤啊？答案是否定的(图6)。我们不妨把太阳系缩小10亿倍——这是一个相当大的缩比了——在这样一个模型中，各主要天体是如何分布的呢(表1)?

首先，太阳是一个直径为139.27厘米的圆球，比呼啦圈大一些，与五年级学生的身高差不多。而离太阳最近的水星，和一颗绿豆差不多大小，与“太阳”相距58米左右；地球成了距离“太阳”149.6米外的一颗小葡萄；行星巨人木星相当于一颗柚子，离“太阳”达到778.6米；天王星的出现让太阳系的直径扩大了整整一倍，而柯伊伯带距离“太阳”已在10千米开外。

这些行星之间几乎就是空荡荡的一片，就连小行星带，恐怕事实也会颠覆我们的想象。在1:1000000000的太阳系模型中，我们假定小行星的平均直径为1千米，总数为1000万个，那么它们会分布在离“太阳”平均距离约400米，宽度为181米的圆环中，好比是每个1微米的颗粒(我们所熟知的PM2.5是指环境空气中空气动力学当量直径小于等于2.5微米的颗粒物)享用着4.75立方米的空

表1 太阳系主要天体尺度与距离对照表

天体	平均直径/km	轨道半长径/ 10^6 km	距离/AU	缩小10亿倍直径/cm	缩小10亿倍距离/m
太阳	1392684	—	—	139.27	—
水星	4878	57.909	0.387	0.49	57.9
金星	12104	108.208	0.723	1.21	108.2
地球	12742	149.598	1.000	1.27	149.6
火星	6779	227.939	1.524	0.68	228.0
小行星带	1(假设平均)	308.172-489.185	2.06-3.27	0.0001	308.2-489.2
木星	139822	778.57	5.204	13.98	778.6
土星	116464	1433.53	9.583	11.65	1433.5
天王星	50724	2875.04	19.218	5.07	2875.0
海王星	49244	4498.0	30.110	4.92	4498.0
冥王星	2377	5906.4	39.482	0.24	5906.4
柯伊伯带	—	~10471.9	~70	—	10471.9
奥尔特云	—	~29919600	~20万	—	~29919600

真实尺度下，相当于每个小行星周围78万千米范围内空无一物!

我们的太阳系是如此之美，各种天体琳琅满目。我们的太阳系是如此之大，用尽一生也未必能逛完。虽然迄今为止人类的足迹尚未走出区区40万千米的范围，不过，令我们感到欣慰的是，人类已经派出去许许多多探测器，它们已经造访了太阳、月球、行星、彗星、小行星、柯伊伯天体，覆盖了太阳系的所有天体类型，甚至在火星、月球周围，部署了多颗人造卫星或地面巡视器，可以做到7×24的持续观测，让它们享受了和地球一样的“待遇”。我们有理由相信，有朝一日，人类足迹一定可以遍布整个太阳系。

参考文献

- [1] 李竞,余恒,崔辰州. 英汉天文学名词. 中国科学技术出版社,2015
 [2] 屈原. 天问

- [3] Saturn Surpasses Jupiter After The Discovery of 20 New Moons And You Can Help Name Them! (<https://carnegiescience.edu/news/saturn-surpasses-jupiter-after-discovery-20-newmoons-and-you-can-help-name-them>)
 [4] 美国航天局, <https://solarsystem.nasa.gov/moons/>
 [5] 苏宜. 天文学新概论. 科学出版社,2019
 [6] 国际天文学联合会小行星中心, <https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>
 [7] Pitjeva E V. Solar System Research, 2018,44 (8—9):554
 [8] Reid M J *et al.* The Astrophysical Journal,2019,885(2):131
 [9] 美国航天局, <https://voyager.jpl.nasa.gov/>
 [10] Morbidelli A. Origin and dynamical evolution of comets and their reservoirs. 2006. arXiv:astro-ph/0512256
 [11] Levison H F, Donnes L. Comet Populations and Cometary Dynamics. In Lucy Ann Adams McFadden; Adams L A *et al.* (eds.). Encyclopedia of the Solar System (2nd ed.). Amsterdam, Boston: Academic Press. 2007, pp. 575—588