

从 Kepler 到 Newton

—— 从万有引力定律的发现谈起

孙义燧

(中国科学院院士, 南京大学教授、博士生导师)

1 万有引力定律的诞生

德国天文学家开普勒 (Kepler) 是丹麦著名天文学家第谷 (Tycho Brahe) 的学生和继承人, 他根据第谷毕生观测留下的宝贵资料, 孜孜不倦地对行星运动进行深入的研究, 提出了行星运动三大定律. 第一定律: 行星绕太阳的轨道为椭圆, 太阳位于椭圆的一个焦点上. 这是根据观测数据总结的; 第二定律: 行星向径在相等时间内扫过的面积相等; 第三定律: 行星绕太阳运动的周期平方与轨道椭圆半长径的立方成正比. 开普勒三大定律为牛顿发现万有引力定律奠定了基础. 牛顿 (Isaac Newton) 在 1665 年提出了“流数”, 即微积分, 并在 1736 年出版了《流数法和无穷级数》. 莱布尼兹 (Gottfried Wilhelm von Leibniz) 在 1684 年发表了微积分文献. 关于微积分创立者的问题造成了欧洲大陆数学家和英国数学家的长期对立. 国际上公认的微积分始创者是牛顿和莱布尼兹. 现在我们使用的微积分通用符号是莱布尼兹创立的. 埃德蒙·哈雷 (Edmond Halley) 和罗伯特·胡克 (Robert Hooke) 根据“行星与太阳之间的引力与它们的距离的平方成反比”断定可以解决所有天体运动定律, 却无法给出数学理论证明. 牛顿运用开普勒定律和自己的力学成就从理论上证明了引力同距离的平方成反比, 提出了万有引力定律, 并用数学论证了行星的运行轨道为椭圆.

牛顿万有引力定律表明, 万有引力是存在于任何物体之间的一种吸引力, 两个质点之间万有引力的大小与它们质量的乘积成正比, 与它们距离的平方成反比.

2 万有引力定律的验证

2.1 哈雷彗星的回归

牛顿曾论证彗星的运行轨道是抛物线, 太阳在抛物线的焦点上. 哈雷以万有引力定律为基础计算了历史上 24 颗彗星的抛物线轨道. 他发现 1682 年出现的彗星轨道与 1607 年和 1531 年出现的彗星轨道非常相似, 同时推测这三颗彗星实际上是同一颗彗星在做周期性的回归. 科学上的成就的最高境界是预言实验; 其次是理论实验, 从理论来解释它. 根据计算, 哈雷预言这颗彗星将会在 1758 年回归, 前后误差 1 年. 在 1758 年的圣诞节, 也即哈雷死后 16 年, 乔治·帕里什观测到了这颗彗星, 的确和哈雷的预言相差无几. 哈雷以万有引力定律为基础推算出这颗彗星的轨道是椭圆, 所以这颗彗星就以“哈雷”命名. 此后哈雷彗星在 1834 年、1910 年和 1986 年共出现了 3 次, 这就有力地验证了万有引力定律的正确性.

2.2 海王星的发现

海王星于 1781 年被发现。当时用万有引力编制木星、土星和天王星历表，人们发现木星、土星的观测资料与理论计算符合得很好，但天王星理论计算位置与实际观测位置总有偏差。许多天文学家依据天文观测资料寻求使天王星在运动上造成“偏差”的未知行星。有两位天文学家对海王星的发现做出了巨大的贡献。一位是剑桥的天文学家亚当斯 (J C Adams)，另一位是法国天文学家勒威耶 (U J Le Verrier)。亚当斯认为天王星的轨道外面还有一颗未知行星，正是它的引力摄动造成了天王星的“奇异”运动。亚当斯经过两年的努力，在 1845 年 9 月 23 日，研究推算出了该未知行星的运行轨道和当时位置。他把计算结果寄给了格林威治天文台台长，并请他用天文台大型望远镜观测这颗行星。格林威治天文台台长却将亚当斯的计算结果束之高阁。1846 年，勒威耶同样推算出了这颗行星的运行轨道和当时位置，将结果交给了德国柏林天文台的天文学家加勒 (Galle Johann Gottfried)。加勒和他的助手“按图索骥”对其进行观测，在勒威耶预言的位置看到了这颗新的行星：海王星。海王星的发现不是观测得到，而是推算出来的，因此历史上称海王星是“笔头上发现的行星”，这也有有力地证明了万有引力定律的正确性。勒威耶的结果几乎与亚当斯的结果完全一致，应该共享发现海王星的荣誉。不过现在天文台有一些解密文件，说明亚当斯不能跟勒威耶享有同等荣誉。事实上两个人预报的位置和实际位置都有些差别，算出的轨道也差很多。所以科学发现里还是存在一定的机遇。

人造地球卫星、空间探测器和载人航天器的发展，同样验证了牛顿万有引力定律的正确性。

3 天体力学的建立及研究内容

万有引力定律出现后，科学上才正式把研究天体的运动建立在力学理论的基础上，从而创立了天体力学。天体力学以数学作为主要研究手段，主要研究天体的运动、自转和形状。

天体力学主要的问题是三体 (N 体) 问题不可积。经典力学对于单体问题、二体问题都可给出精确的解答，但对三体问题，如日、月、地三者的相对运动，却一直无法求出精确解。三体问题不可积是指三体的运动无法用已知的函数表达出来。还有共振问题。现发现的小行星数量达一百多万个，已知真正编号的只有两万多个。直径从几公里到几百公里不等，运动五花八门。在火星与木星轨道之间的小行星带，小行星的密度一点也不均匀，某些地方的小行星数目寥寥可数，这个区域称为柯克伍德空隙 (Kirkwood Gaps)。小行星绕太阳的公转周期是木星的公转周期的简单分数，两个运动频率成简单分数之比的时候，物理上叫共振，数理上叫小分母。共振有时会瓦解一个运动，有时会稳定一个运动，非常复杂。目前有很多共振问题没有解决。

研究小行星的重要目的之一就是防范小行星碰撞地球。若小行星碰撞地球，将产生相当于一亿万吨的 TNT 能量。有颗小行星在加拿大西部上空爆炸，结果炸出了一个直径达 65 公里的石坑，熔化了约有 200 米深的岩石。关于恐龙灭绝的一个理论就是，小行星坠落在地球表面，引起一场大爆炸，大量的尘埃形成遮天蔽日的尘雾，导致了气候变化，地球进入冰河期，最终造成了恐龙灭绝。1994 年，彗星和木星相撞，产生了相当于 140 个氢弹爆炸的能量，木星被撞出了一个比地球还大的洞。避免小行星与地球灾难性碰撞的方法之一就是成立联合监测网，国际上互相协作，早日发现威胁地球的小行星。我国在南极附近有架口径达 1.2 米的望远镜，专门监测小行星。

太阳系外行星系统和军事上的探测等都需要高端设备。如天文上用红外线望远镜和夜视仪等观测星体。这些设备本身带动科学高科技的发展。

4 天体力学的发展

4.1 推动天体力学发展的因素

推动天体力学发展的因素之一：光测技术的提高。现在我国的哈勃（Hubble）空间望远镜技术比国外落后。在地球上望远镜受大气层限制，大气抖动，就无法光测。哈勃空间望远镜的位置在地球的大气层之上，因此获得了地基望远镜所没有的好处，影像不会受到大气湍流的扰动，视相度绝佳又没有大气散射造成的背景光，还能观测会被臭氧层吸收的紫外线。美国的 Keck 天文台望远镜直径达 10 米。望远镜非常精密，牵涉到很多技术的发展。现在有一种技术叫主动光学，在观测过程中内置的光学修正部件对像质进行自动调整，使之保持在光学聚焦的焦点上。还有一种技术叫自适应光学。自适应光学测量出在每一瞬间所有的影像畸变，并且通过望远镜光路上的器件来校正这些畸变，还原星像。

推动天体力学发展的因素之二：现代数学理论的应用。例如 KAM 理论，它是二十世纪最伟大的数学成就之一，是经典力学里讨论近可积保守系统（哈密顿系统、可逆系统和保体积映射）的动力学性态的著名理论。利用 KAM 理论可以解决天体力学中平面圆型限制性三体问题的周期解和平动点的稳定性。

推动天体力学发展的因素之三：高速计算机的发展。随着观测精度的日趋精良，发现了越来越多的小行星，其中包括在木星轨道上的脱罗央群（Trojan）小行星。由于脱罗央群小行星位于拉格朗日特解所确定的区域，故引起了天体力学家的极大兴趣。应用计算机可以测量这些小行星轨道的变化。托卡马克（Tokamak）装置是一种利用磁约束来实现受控核聚变的环性容器。装置从内到外一共有五层部件构成，其中央是一个环形的真空室，外面缠绕着线圈，最内层的环形磁容器像一个巨大的游泳圈，这是模拟太阳聚变反应的关键部位。通过计算机数值模拟方法，保障托卡马克装置安全运行。

4.2 天体力学发展的方向

天体力学发展的新方向：非线性天体力学和相对论天体力学。航天器的发射轨道及返回轨道等都是天体力学研究的内容，例如“神舟”五号载人飞船、土星探测器卡西尼——惠更斯号（Cassini-Huygens）飞船，还有小行星拖船的方案。

“神舟”五号是中国首次载人航天行动。它随着火箭上升，其捆绑助推器、逃逸塔（位于前端）、第一级以及有效载荷整流罩被抛弃。一旦进入轨道，火箭的第二级将从“神舟”五号载人飞船脱离，现时打开太阳能帆板。在返回大气层之前，“神舟”五号的各舱就已分离：轨道舱留在太空中，推进舱在大气中焚毁，而返回舱搭载航天员返回地面，并且使用降落伞和制动火箭减缓着陆。“神舟”五号从酒泉卫星发射中心起飞之后，上升到太平洋上空，此时有一艘“远望号”测量船跟踪它，进行数据测量和轨道计算。返回地球时，飞船在南大西洋上空启动一台制动引擎。该制动火箭点火操作受到纳米比亚斯瓦科普蒙德附近的地面跟踪站的监视。

卡西尼——惠更斯飞船在太空穿行了 30 多亿千米才飞抵土星系统。自 1997 年发射以来，该飞船先后经历了 4 次借助引力变轨，也就是从行星近旁掠过而加速，包括两次飞越金星，一次飞越地球和木星。2004 年 7 月 1 日，卡西尼号飞船将穿过土星环的缝隙，并在到达最接近土星的位置时点燃发动机，产生一个与运动方向相反的推力，这一动作将使飞船减速，从而进入一条椭圆形轨道。之后发动机还点火若干次以对轨道进行调整，为惠更斯号探测器拜访土卫六做好准备。

避免行星撞击地球有小行星拖船的方案。太空拖船通过沿小行星轨道运动的方向去推动它，可以改变其轨道。假定太空拖船在小行星预期撞上地球之前 12 年开始推小行星，小行星的轨道周期为 1.15 年。太空拖船连续三个月推动，使小行星的轨道运动速度增加 1 厘米/秒，轨道也相应稍稍增大。小行星在增大的轨道上运行 12 年后，比它未受太空拖船推动时的预计位置滞后 6 720 千米。被拖船推开了的小行星将落在地球后面，与预算碰撞点的距离将大于地球半径。被推开的星体到达预定碰撞点时，地球已经脱离了危险区域。

“月球火箭”在科学、政治和军事上都有意义。科学上主要是了解月球表面。关于月球产生有各种说法。地球分裂说认为，在太阳系形成的初期，地球和月球原是一个整体，那时地球还处于熔融状态，自转快。由于太阳对地球强大潮汐力作用，在地球赤道面附近形成一串细长的膨胀体，最终分裂而形成月球。地球俘获说认为，月球可能是在地球轨道附近运行的一颗绕太阳运行的小行星，后来被地球所俘获而成为地球的卫星。共同形成说的研究者认为地球和月球是由同一块原始行星尘埃云所形成，它们的平均密度和化学成分不同，是由于原始星云中的金属粒子在形成行星之前早已凝聚。在形成地球时，一开始以铁为主要成分，并以铁作为核心。而月球则是在地球形成后，由残余在地球周围的非金属物质凝聚而成。其次月球上有丰富的氦-3 岩石。氦-3 是一种清洁、安全和高效的核聚合发电燃料。开发利用月球土壤中的氦-3 是解决人类能源危机的途径之一。地球上氦-3 的储量总共不超过几百公斤，难以满足人类的需要。但是在月球上，它的储量却非常可观。从 20 世纪 90 年代开始，包括中国、以色列、日本、印度等国家在内，人类掀起了新一轮的探月高潮，氦-3 是探月的重要目标之一。我国“嫦娥一号”探月卫星搭载的探月仪器的一项重要内容就是探测月球土壤厚度与元素含量。氦-3 作为最有潜力的新能源，已经成为世界各国能源研究的重要课题。再次就是建造月球基地。宇航员可以在固定基地上进行长期试验，涉及的领域包括太空生物学、地理学、天文学和物理学等，研究探索人类身体对外太空环境的反应，并为人类登上火星做准备。

航天工程的发展将带动整个科技的发展。没有牛顿万有引力定律，就没有航天事业。这也充分证明邓小平同志讲的“科学技术是第一生产力”论断的正确性。