

# 走向统一的自然力

所谓“自然力”，就是主宰宇宙间物质运动的四种基本相互作用，即作用在一切物体（包括星体）之间的引力；作用在带电（磁）物体之间的电磁力；以及作用在微观粒子之间的强力和弱力。表 1 给出了这四种自然力的主要特性。

表 1 四种自然力的主要特性

名称	力程 (m)	相对强度	媒介子	参与物体或粒子
引力	$\infty$	$10^{-38}$	引力子 (?)	一切有质量的物体，包括强子和轻子
电磁力	$\infty$	1/137	光子	带电（或磁）的物体，包括带电（或磁矩）的强子和轻子
强力	$10^{-15}$	1 ~ 10	胶子	强子
弱力	$10^{-18}$	$10^{-5}$	中间玻色子	强子和轻子

（注：“？”表示仅有理论预言，尚无实验发现。）

人类在探索自然界奥秘的过程中一直期盼着能统一这四种自然力。17 世纪，苹果落地使牛顿联想到万有引力，将“天上力”和“地上力”统一了起来；19 世纪，奥斯特、法拉第和麦克斯韦等经过长时间的努力终于将“电力”和“磁力”统一了起来；20 世纪，爱因斯坦在提出狭义相对论和广义相对论，完善地描述了电磁力和引力之后，一直试图统一它们，但至死未能如愿。使他没想到的是，电磁力却与 20 世纪初刚刚认识的弱力统一了起来——格拉肖、温伯格和萨拉姆等建立了弱电统一理论。而今，物理学家们，一方面试图在杨（振宁）-米尔斯规范场理论的基础上，将弱电统一理论与描述强子内部夸克之间强力的量子色动力学加以综合，以统一强力、弱力和电磁力；另一方面，又希望在超弦理论框架里将四种自然力都统一起来。

本系列讲座将较为详细地介绍四种自然力走向统一的探索历程，共分 6 讲：1. 天上力与地上力的统一；2. 电力与磁力的统一；3. 爱因斯坦：试图统一电磁力与引力未能成功；4. 弱力与电磁力的统一；5. 强力、弱力和电磁力的大统一；6. 超弦理论：四种自然力走向统一的一种尝试。

（厉光烈）

# 天上力与地上力的统一 (I)

厉光烈 黄艳华

人类对力的认识经历了漫长的历史过程。力的概念,起先可能是从原始人类在狩猎活动中需要用力投掷石块等以击倒野兽的体验中得来的。公元前4世纪,我国思想家墨翟就对“力”做出了正确的表述,他在《墨经》中写到:“力,形之所以奋也”,用现在的话说,就是“力是改变物体运动状态的原因”,应当从运动的角度来认识力的本质。本讲座,首先在第一、二部分通过讨论天上星星的运动和地上物体的运动分别引入天上力和地上力,然后在第三部分讨论天上力和地上力的统一。

## 1. 天上的运动

早在远古时期,人类就开始注意天上星星的运动。所谓“斗转星移”,就是指以北斗七星为代表的天上的星星自东向西围绕地球的运动。现在我们知道,这是由地球自转引起的,但在当时人们却直观地认为,就像太阳“早上自东边升起,晚上从西边落下”一样,天上的星星是在绕地球运动。于是,古希腊哲学家便提出了“地心说”。

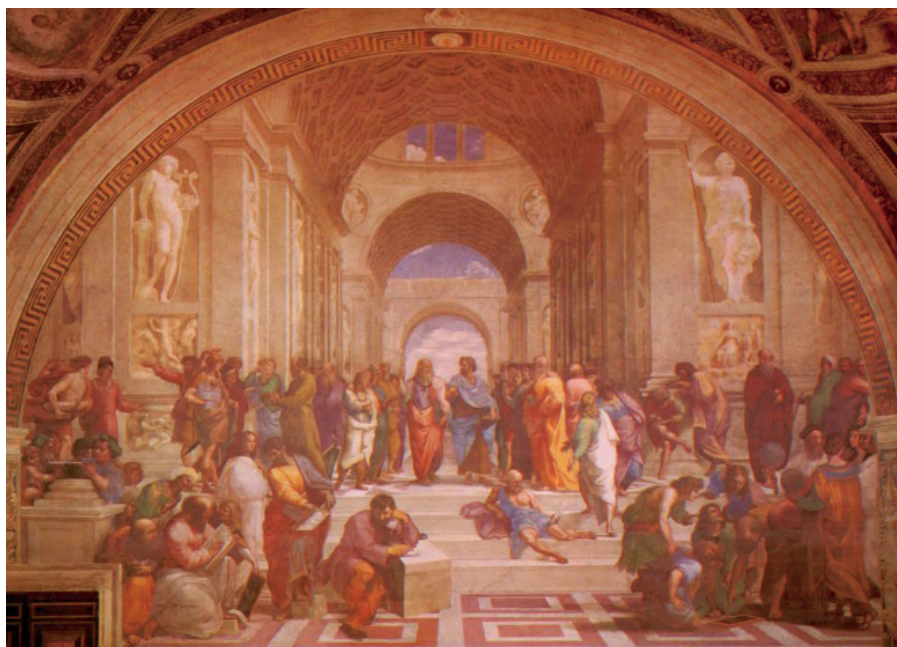
### 古希腊的地心说

公元前7世纪末,古希腊米利都人泰勒斯(Thales,约前624~约前547)曾提出:“世界由水构成,大地是浮在水面上的巨大圆盘”。大约100多年后,古希腊思想界曾就“大地是圆的还是平的?”在雅典展开了激烈的争辩,著名思想家苏格拉底

(Socrates,前469~前399)相信“大地是一个球体,位于宇宙的中心”。后来,他的学生柏拉图(Plato,约前427年~前347年)的得意门生亚里士多德(Aristotle,前384~前322)发展他的这一想法,系统地提出了地心说。亚里士多德认为,地球位于永恒的宇宙的中心,太阳、月亮、行星和恒星都围绕着地球做圆周运动,离地球最近的是月亮,因此,他将宇宙分为“月上世界”和“月下世界”:“月下世界”由(土、水、火、气)四种元素组成,其中的万物是会腐朽的;“月上世界”由闪亮的星星组成,其间充满了透明而无重量的“以太”。“月上世界”又分为九重天,依次为月亮天、水星天、金星天、太阳天、火星天、木星天、土星天、恒星天和

最高天,闪亮的星星就镶在这些“天”的天球上,最高天,也称原动天,是宇宙的边界,其外没有任何东西。组成“月上世界”的星星和“以太”都是永恒的、不会腐朽的。亚里士多德还认为,天上的星星不会自己运动,是原动天里一个自己不动的“第一推动者”在推动恒星天,恒星天再带动其他诸天,一起围绕地球旋转。

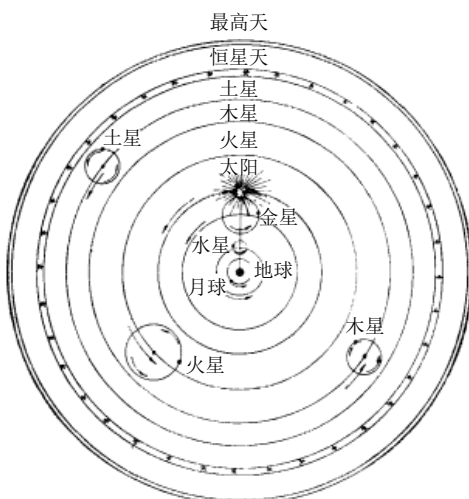
其实,在苏格拉底之前,泰勒斯的学生毕达哥拉斯(Pythagoras,约前572~约前497)就已认识到大地是球形的,并提出了“地球”这个概念。他认为宇宙也是球形的,还就宇宙结构提出过“中心火”模型,即火是最圣洁的东西,应该位于宇宙的中心,太阳、地球、月亮、行星和恒星都镶在相应的天球上,围绕“中心火”转动。



雅典学园 16世纪初,拉斐尔为梵蒂冈所绘的壁画。拉斐尔把古希腊不同时期的精英人物绘入其中,集中表现了古希腊创造的辉煌文明。画中,用手指天的是柏拉图;用手指地的是亚里士多德。右边,面向观众手托天球者为托勒密。



托勒密



托勒密地心宇宙体系示意图

1496年踏上去意大利的旅途。他在意大利学习、考察了10年。在博洛尼亚大学留学期间，他结识了意大利天文学家德·诺瓦拉。他们在探讨月球运行规律时，发现托勒密有关“上下弦月离地球比满月要近二分之一”的观点违背常理：在日常生活中，人们看到的物体总是离自己越远则越小。为了用观测事实来证实他们的怀疑，1497年3月9日，哥白尼和诺瓦拉一同登上圣约瑟夫教堂的塔楼，观测夜空中的上弦月，发现金牛座亮星毕宿五在靠近月亮时突然消失了，

而且消失的地方不是半月的后面，而是淹没在月亮缺蚀的阴影里。经过通宵达旦的运算，得出的数据表明：月亮在亏缺和盈满时，不仅大小丝毫没有变化，而且距离地球的远近也完全一样。就这样，一千多年来一直被奉为经典的亚里士多德-托勒密地心宇宙体系终于被打开了一个缺口。

在意大利学习、考察期间，哥白尼还阅读了大量的古希腊文献，其中，既有毕达哥拉斯的“中心火”，也有阿里斯塔克的“日心说”。加上，当时已有人认为内行星（即比地球离太阳更近的水星和金星）是围绕太阳旋转的，只不过误认为它们同太阳一起绕着地球转。受到启发，哥白尼开始认识到，只要把地球从宇宙的中心移开，把太阳放到宇宙的中心，一切就会变得简洁而协调。经过长期反复的思考，他提出了自己的“日心说”。与古希腊的只是一种猜想的“日心说”相比，哥白尼给出的是一个科学的、量化的日心宇宙体系。

1506年，哥白尼回归波兰后，一直留在舅父路卡斯·瓦琴洛德主教身边，担任其顾问，无暇顾及他所喜爱的天文学研究，直到舅父去世。

大约200多年后，古希腊天文学家阿里斯塔克（Aristarchus，前315年~前230年）还曾提出过最早的“日心说”，即恒星与太阳是不动的，而地球则绕太阳做圆周运动。但是，当时日心说的拥护者极少。到公元2世纪，希腊天文学家和数学家托勒密（Claudius Ptolemaeus，约90~168）在其著作《天文学大成》（阿拉伯人称之为《至大论》）中改进和量化了地心说，使之与天文观测符合得更好，于是改进后的地心说击败了粗糙的日心说。

到了中世纪，亚里士多德-托勒密地心说逐渐被天主教会所利用。教会明确提出：上帝生活在原动天，是上帝的推动才使得诸天围绕着地球旋转。亚里士多德-托勒密地心说与《圣经》所描绘的宇宙图像不谋而合，这使其成为神学的一个支柱，在天文学中占据统治地位达1300年之久。

### 哥白尼的日心说

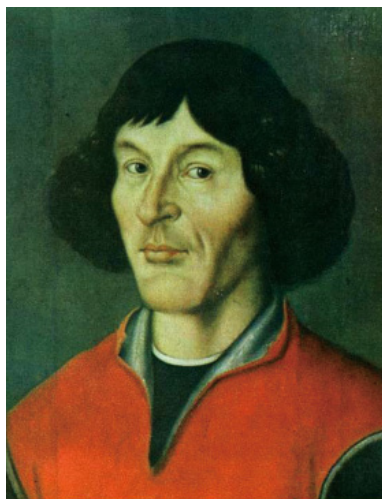
尼古拉·哥白尼（Nicolaus Copernicus，1473~1543），著名天文学家、日心说的创立者、近代天文学的创始人。1473年2月19日，他诞生在波兰维斯瓦河畔托伦城一个富裕的商人家庭。他自幼聪颖好学，最

令其心神向往的，就是在万籁俱寂的晚上，跪在窗前高背椅上，仰望繁星密布的夜空，憧憬探寻星星的奥秘。10岁那年，瘟疫夺去了他父亲的生命，学识渊博、思想开明的舅父路卡斯·瓦琴洛德主教成为他的监护人。

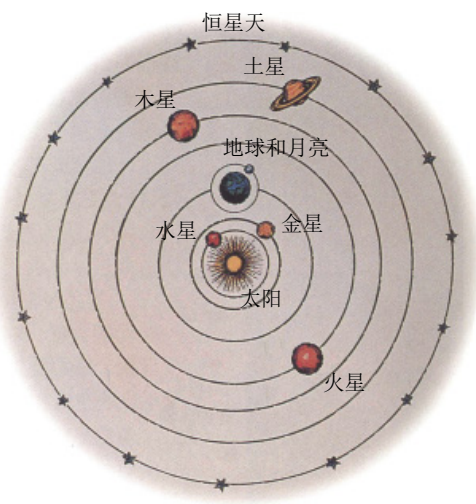
1491年，哥白尼进入波兰克拉科夫大学学习法律、拉丁文和希腊文。克拉科夫大学是所历史悠久、名师荟萃的高等学府，尤以天文学和数学的高水准享誉欧洲。求学期间，他得到了天文学家伊切赫·布鲁泽夫斯基的赏识，对天文学产生了浓厚的兴趣。在伊切赫的指导下，哥白尼潜心钻研托勒密地心说。他发现，越是深入地钻研托勒密学说，越是深切地感到它对实际观测资料的解释牵强附会、漏洞百出。他还发现，天文学的发展长期以来一直受神学羁绊，就好像是在不停地为托勒密地心宇宙体系的破绽打“补丁”，因此他暗下决心，要从天文学的根本问题着手，从全新的角度去考虑宇宙的结构。

1493年，因十字军东征侵犯波兰国家利益，需要有人精通罗马“教会法”，哥白尼毅然中断学业，在舅父的安排下，以教士的身份，于





哥白尼



哥白尼日心宇宙体系示意图

教会逐渐领悟到哥白尼日心说对自己的威胁，于是下令禁止哥白尼著作的出版，禁止日心说的讲授与传播。19世纪初，资产阶级革命陆续在欧洲各国取得胜利。1822年，罗马教廷终于颁布敕令：“那些讨论地球运转和太阳静止不动的著作，根据目前天文学家的一致意见，准予印行”，《天体运行论》终于重见天日。哥白尼日心说是伟大的、具有开创性的，它不仅揭开了近代天文学的序幕，而且让自然科学从神学里解放了出来。

### 捍卫日心说 布鲁诺遭火刑

布鲁诺（Giordano Bruno, 1548～1600），文艺复兴时期意大利哲学家、科学家和思想家。他出生于意大利那不勒斯附近的诺拉镇，幼年丧失父母，家境贫寒，由神父抚养长大，15岁进入修道院，成为意大利天主教多明我会修士。在修道院里，除了学习神学，他还刻苦钻研希腊、罗马的语言文学和东方哲学，10年后，获得了神学博士学位和神父教职，成为了当时有名的学者。

还在修道院学习的时候，他就不顾教会的反对，勇敢地站出来为哥白尼日心说辩护。这一方面是因为，他生活在教会内部，了解其中的腐败和黑暗；另一方面，他深受文艺复兴思想的影响，主张思想自由，一接触到日心说，就兴奋不已。从此，他便把宣传日心说作为自己的生活目标。他离经叛道的言行激怒了教会，被开除了教籍。1576年，为了躲避宗教裁判所的追捕，逃往意大利北部，两年后流亡国外，在欧洲各地过着漂泊不定的生活。这期间，他不仅到处作报告、写文章、参加大学的辩论会，积极地宣扬、捍卫哥白尼日心说，还进一步丰富和发展了哥白尼学说。哥

之后，他定居弗龙堡，成为弗龙堡大教堂牧师会僧正。这期间，除了承担大量的行政事务之外，他的精力主要用于天文学研究。他几乎精通当时数学、天文、医学和神学方面的全部知识，在天文学上的名声更是与日俱增。1514年，教皇克莱门特七世邀请他参与历法修订，使他进一步发现了亚里士多德-托勒密地心说的诸多弊端。经过数十年的深入研究，哥白尼掌握了丰富的天体运行知识，在他的唯一学生、来自德国威登堡大学的雷蒂库斯的帮助下，三易其稿，终于在1540年完成了巨著《天体运行论》。全书共分6卷：第一卷主要论述日心说的基本思想，是全书的精髓；第二卷介绍地球的三种运动（自转、公转和赤纬运动）及其引起的诸如昼夜交替、四季巡回等现象；第三卷讨论岁差，即因地球自转轴的空间指向和黄道平面的长期变化而引起的春分点移动现象；第四卷专门论述哥白尼最钟爱的月球，特别是对日月食的研究；第五、六两卷论述当时人们已经知道的金、木、水、火、土五大行星的轨道及其运行规律。

《天体运行论》以无可辩驳的

事实对亚里士多德-托勒密地心宇宙体系进行了彻底的批判，从根本上动摇了1300多年来教会让人信奉的神学宇宙观。哥白尼深知，这会触怒教会，引来杀身之祸，所以他迟迟不敢公开发表这部巨著。后来，在好友柳瓦巴教区主教铁德曼的支持下，才让雷蒂库斯将书稿专程送到纽伦堡，交给了著名出版商奥西安德尔。又等待了两年，1543年5月24日下午，就在哥白尼病逝前一小时，刚印刷好的还在散发着油墨香气的《天体运行论》才送到他的床前，医生将他的双手轻轻放在书上，他颤抖地摩挲着书脊，发出了会心的微笑。但是，哥白尼至死都不知道，罗马教廷之所以能让他的书公开出版，一方面是因为，这本书是用拉丁文写的，阅者不多，影响有限；另一方面，奥西安德尔在书中塞进了一篇杜撰的伪序。直到300年后，人们才在布拉格一家私人图书馆里发现了《天体运行论》原稿，重新出版了增补哥白尼原序的《天体运行论》。

17世纪中叶，天文学取得了长足的进步，特别是在布鲁诺和伽利略等用意大利文宣扬哥白尼体系之后，

白尼认为太阳是宇宙的中心，地球、行星和恒星都围绕太阳转动。布鲁诺则认为，宇宙没有中心，恒星都是太阳，只不过是远离我们的太阳。不仅如此，他还突破了宇宙有限的思想：不论是托勒密的地心说还是哥白尼的日心说，都认为宇宙是有限的球体，布鲁诺却声称，宇宙不仅在空间上无边无限，而且在时间上无始无终。在其所著《论无限、宇宙及世界》、《论原因、本原及统一》等书中，他全面地阐述了“宇宙是无限的、永恒的和统一的”以及“宇宙中的一切都是由物质构成的”等观点。现在看来，他的宇宙观已经非常接近现代的科学宇宙观，但在当时，布鲁诺的真知灼见却使人感到茫然，为之惊愕！甚至连被誉为“天空立法者”的开普勒也无法接受。

1592年初，布鲁诺被朋友诱骗回国讲学，落入教会的圈套，被捕入狱。因批判经院哲学、反对地心说和宣扬日心说等“罪名”，他被罗马教廷宗教裁判所视为“异端”，教会曾试图通过威胁利诱动摇布鲁诺相信真理的信念，迫使他当众悔悟，但得到的回答是：“我的思想难以跟《圣经》调和”，“在真理面前，我半步也不会退让！”经过长达八年的不断审讯和残酷折磨，1600年2月17日，布鲁诺被判处火刑，烧死在罗马鲜花广场。据说，他在听完判决后大义凛然地说：“你们宣读判决时的恐惧心理，比我走向火堆时还要大得多。”1889年6月9日，在布鲁诺殉难的鲜花广场上，人们为他树立了铜像，永远地纪念这位为真理而献身的殉道者。

### 宣扬日心说 伽利略被囚禁

伽利略·伽利雷 (Galileo Galilei, 1564 ~ 1642)，意大利物理学家，近



布鲁诺



罗马鲜花广场上树立的布鲁诺铜像



宗教裁判所火刑处死异端时的情形

代实验科学的先驱者，后人誉其为“近代科学之父”。1564年2月15日，伽利略诞生在意大利比萨城一个没落的贵族家庭。他从小聪明、灵巧，父亲对他寄以厚望。17岁那年，他遵从父亲的意愿，进入比萨大学学习医学。但是，他对医学并无兴趣，而是把课外时间大多用于学习和研究古希腊的哲学、欧几里得的《几何原本》和阿基米德的数学著作。家庭贫寒使伽利略不得不提前离开大学，但他仍继续在家里刻苦钻研数学，并很快就

在数学研究中取得了优异的成绩。他21岁便闻名全国，被誉为“当代的阿基米德”。1589年，经盖特保图侯爵推荐，年仅25岁的伽利略被比萨大学破例聘为数学讲师，任期3年。传说中的比萨斜塔实验可能就是在这一期间进行的。后来，因伽利略公开抨击亚里士多德运动学说，激怒了早就对他心怀不满的亚里士多德信徒，使他失去了被比萨大学续聘的机会。珍惜人才的盖特保图侯爵再次伸出援助之手，将他推荐给帕多瓦大学，1592



年，伽利略被任命为这所大学的数学、科学和天文学教授。帕多瓦是意大利北部距离威尼斯不远的一座小城，当时属于威尼斯共和国管辖。帕多瓦大学受罗马教廷影响较小，自由思想气氛浓厚，在这里伽利略进入了研究、创造的黄金时期，在力学和天文学方面都取得了丰硕的成果。

1609年5月，伽利略听说荷兰眼镜制造师发明了一种被称为望远镜的光学装置，能让很远的物体看起来非常近。于是，他依靠自己的光学知识和研磨透镜的特殊技能，在24小时内就用一块平凸透镜和一块平凹透镜设计制造出了比荷兰工匠制造的还要好的望远镜。望远镜的发明使伽利略改变了研究方向，将注意力转向广漠无垠的茫茫太空。他发现，用自制的望远镜来观测天空中的月亮、行星、太阳和恒星，比用肉眼观测移近了30倍。他说：“我用我的‘镜片’观察了天体，这些天体大得不得了，因此我非常感谢上帝，由于他的垂爱，使我成为观察如此值得赞叹而过去一向不为人知的事物的第一人。”在1609~1610年间，伽利略通过观测发现了一系列前所未有的天文现象。例如：月亮表面也和地球表面一样是粗糙不平的，它本身并不发光，而是反射太阳的光，他还从月亮表面山脉的影子测出了它们的高度；发现银河也是由大量星星组成的，而不是亚里士多德所说的“地球上的水蒸气凝成的白雾”，当他将望远镜指向天空的任何方向时，看到了比肉眼看时多得多的星，从而驳斥了亚里士多德认为“天空中只有数目不变的星”的观点；观察到了金星的周相变化，表明金星是围绕太阳运转的，这明显支持哥白尼的日心说；发现木星居然有4颗卫

星围绕着它旋转，俨然是一个小“太阳系”，这也与亚里士多德的教义“宇宙中只有一个中心，一切都围绕着它旋转”相冲突，同时，这也支持了布鲁诺“除太阳外，宇宙中还有其他吸引中心”的观点。1610年，伽利略出版了记载这些重要发现的《星际使者》一书。《星际使者》的发表，不仅在意大利，而且在整个欧洲引起了轰动，使伽利略一举成名。但是，也有人说：伽利略看到的不过是气候现象，或者是望远镜的假象，等等。反对意见大大刺激了伽利略，使他决心继续寻找新的奇异天象。他将太阳的像投射到纸上来观测太阳黑子，发现了太阳黑子及其在太阳表面有规律

的运动，并由此判断出太阳也在自转，周期大约为27天。新的天文观测使伽利略更加坚信哥白尼学说，他决定把事情公开，向大众作宣传。1613年，他出版了《论太阳黑子的信》，首次明确地公开支持哥白尼学说。

由于宣扬哥白尼的日心说，伽利略在1616年受到宗教裁判所的警告，不许他在课堂上把哥白尼学说作为真理来讲，同时哥白尼的《天体运行论》也被列为禁书。作为一个教徒，伽利略只好服从，被迫声明放弃哥白尼学说。但是，在内心深处，他仍坚信哥白尼学说是完全正确的。经过长期酝酿、构思，在1624~1629年间，伽利略完成了《关于托勒密和



伽利略演示自己制造的望远镜



伽利略制造的天文望远镜



1632年版《对话》卷首插图



伽利略面对宗教裁判所的审判

哥白尼两大世界体系的对话》这部巨著（以下简称《对话》）。在这本书中，他创造了三个人物，让他们辩论哥白尼体系与亚里士多德-托勒密体系各自的长处，表面上，辩论并未决出谁胜谁负，实际上，却是在宣传哥白尼学说。为了怀念他在佛罗伦萨和威尼斯结识的两位已经去世的朋友，他把书中的两个人物分别命名为萨尔维阿蒂和沙格列陀，其中萨尔维阿蒂为哥白尼说话，而沙格列陀则像一个聪明的陪衬，实际上伽利略是借他之口为自己说话，第三个人物信仰亚里士多德-托勒密学说，伽利略将其取名为辛普利邱。1629年，他完成了《对话》的写作，经过两年的努力，在加上罗马检察官写的序言和结束语后，这部巨著才得以出版。它很快赢得了读者的共鸣，伽利略所用的“对话”形式确实打动了读者，特别是，书中那位令人发笑的讽刺性人物辛普利丘更让读者印象深刻，而这却惹恼了教皇乌尔班八世，他不但没有被萨尔维阿蒂与沙格列陀的机智及辛普利邱的软弱所逗乐，反而从辛普利邱的话中察觉到他自己的一些观点。于是，他让检察官命令出版商停止印刷和销售《对话》，并要求宗教裁判所对伽利略进行审判。1633年4月12日，伽利略抱病前往罗马，接受审判。6月22日，伽利略接到判决书：《对话》被列入禁书目录，他本人则被处以终身监禁。传说，伽利略在听到判决后，用脚踏地说：“然而，它还是在动啊！”1642年1月8日，双目已经失明的伽利略在监禁中病逝。300多年后，新的罗马教皇保罗二世于1979年11月11日公开承认教会当年的判决是错误的，为伽利略正式恢复了名誉。

## 修改日心说 第谷搞“折中”

第谷·布拉赫（Tycho Brahe, 1546～1601），以观测精密而著称的丹麦天文学家。1546年12月14日，他诞生在丹麦克努兹斯图普（今属瑞典）的一个贵族家庭。从13岁开始，先后在哥本哈根大学和莱比锡大学学习法律和哲学。1560年，有人预报了一次日食，这使他惊讶不已，从此对天文学产生了浓厚的兴趣。

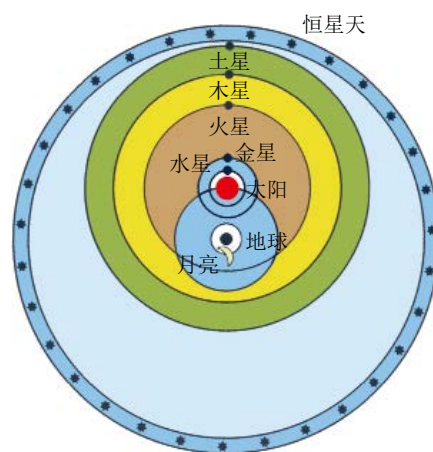
1563年，第谷观察了木星合土星。所谓“合”，指的是两颗行星在天空靠在一起。他就此写出了第一份天文观测报告，指出“合”的发生时刻比星历表预言的早了一个月，这使他领悟到：当时用的星历表不够精确，于是他开始了长期的系统观测，



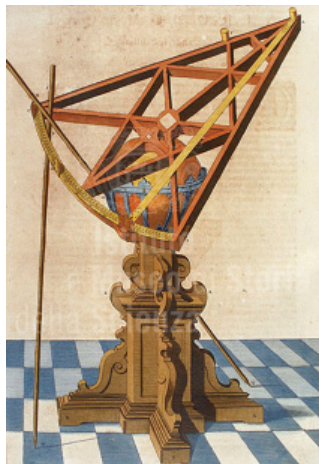
第谷

以便编制更精确的星历表。1566年，第谷开始到各国游历，并在德国罗斯托克大学攻读天文学。从此，他开始了毕生的天文研究工作。1572年11月11日，他在仙后座发现一颗新的明亮的恒星，第谷将其称为“新星”，后人称其为“第谷星”。使用自己制造的仪器，他对这颗星进行了一系列观测，直到1574年3月这颗星变暗到看不见为止。前后16个月，他不仅仔细地进行了观察并作了详细的记载，还收集了欧洲各地的观察数据，结果发现：新星的位置离地球极远。这彻底地动摇了亚里士多德关于天上星星永恒不变的学说，开辟了天文学研究的新领域。

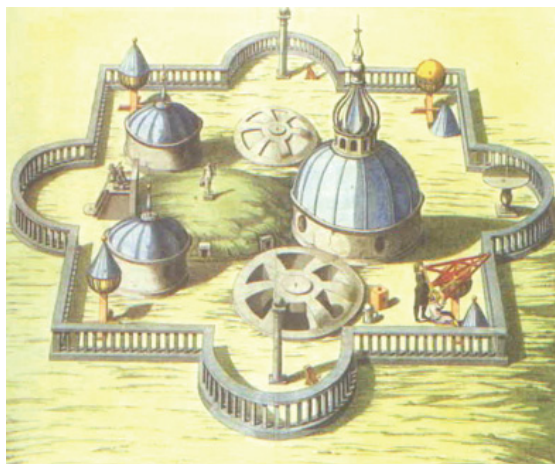
“新星”的发现，使第谷一举



第谷“折中”宇宙体系示意图



第谷肉眼观测所用的六分仪



汶岛上的乌拉尼堡



成名，他的天文学研究得到了丹麦国王腓特烈二世的大力支持。1576年，腓特烈二世将丹麦海峡中的汶岛赐予第谷，并拨巨款让他在岛上修建大型天文台——乌拉尼堡。这座被誉为“观天堡”的天文台于1580年建成，第谷在那里安心地从事天文观测近20年，创制了一批先进的天文仪器，积累了大量精确的观测资料，发现了许多新的天文现象，取得了一系列重要的研究成果。他是最后一位也是最伟大的一位用肉眼观测的天文学家，他所做的观测精度之高，是他同时代的人望尘莫及的，至今尚未有人能在没有望远镜的条件下进行更为精确的观察。

第谷是一位杰出的观测家，但是，他的宇宙观却是错误的。第谷本人不接受任何地动的思想，他曾提出一种介于地心说和日心说之间的宇宙结构体系，即所有行星都绕太阳运动，而太阳则率领众行星绕地球运动。他的体系被称为“折中”宇宙体系，实质上，属于地心说。尽管如此，他对天文学的贡献仍然是不可磨灭的，后人奉其为近代天文学的奠基人。

1588年，第谷的保护人腓特烈二世逝世。继任国王，由于无法容忍他的脾气，不再资助他的天文研究。

1597年，在波希米亚皇帝鲁道夫二世的帮助下，第谷移居布拉格，建立了新的天文台，但只工作4年就去世了。他在布拉格工作的最大收获就是得到了一个杰出的助手和继承人——开普勒。

### 开普勒——“天空立法者”

开普勒（Johannes Kepler，1571～1630），发现行星运动三定律的德国天文学家。1571年12月27日，开普勒诞生在德国斯图加特附近的魏尔市。1577年出现的大彗星给孩提时代的开普勒留下了深刻印象，使他对天文学产生了兴趣。在图宾根大学，他虽然花了三年时间学习神学，但是自己还是喜欢数学和天文学。他的天文学教授麦斯特林是日心说的拥护者，上课时公开讲授的是托勒密地心说，私下里却对自己亲近的学生（包括开普勒）宣传哥白尼日心说，这使开普勒成为哥白尼学说的忠实信徒。但是，开普勒并不接受布鲁诺的观点，不承认宇宙无限，也不认为恒星是遥远的太阳。像哥白尼一样，他认为日心宇宙体系的最外层是恒星天。

开普勒长期致力于寻找各行星轨道之间的数学关系。哥白尼学说和古希腊毕达哥拉斯学派关于宇宙中

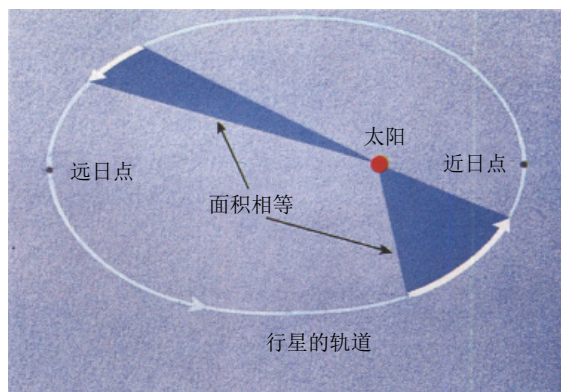
存在着优美数学秩序的观念强烈地影响着他。柏拉图早已证明，正多面体只有五种。通过反复计算，开普勒惊奇地发现，以球的内接和外切这五种正多面体刚好可以给出当时已发现的六大行星轨道半径之间的关系。这样给出的行星轨道，与当时的观测值符合得很好。于是，开普勒认为自己为宇宙中仅有的六颗行星找到了几何依据和神学依据：原来上帝是位几何学家！开普勒提出了六个行星绕太阳运动的几何模型，成为第一个公开支持哥白尼学说的天文学家。1596年，他把这些发现写成《神秘的宇宙》一书公开出版。第谷和伽利略看到此书后都非常赞赏。1600年，开普勒接受第谷的邀请到布拉格天文台工作。从那时起，他接触到第谷积累的大量精确的观测资料，这才发现自己的宇宙模型漏洞百出，所谓的“行星轨道的多面体学说”与第谷的精密观测资料并不相符，于是只好放弃。翌年，第谷去世，开普勒接替了他的工作，并继承了他的宫廷数学家的职务。第谷将自己一生辛勤收集的大量珍贵、详实的观测资料留给了开普勒，并嘱托他把这些观测结果整理出来发表，还希望他制作一部以鲁道夫皇帝命名的星表，以报答这位皇帝的知遇之恩。



开普勒



六大行星及其椭圆轨道



开普勒第二定律示意图



开普勒遵照第谷的遗愿，克服种种困难，经过艰苦繁杂的计算和编制，终于在1627年完成了《鲁道夫天文表》，它是当时最精确的天文表，至今仍在使用价值。

开普勒坚信天体运行是有规律的，而且这些规律必定具有普遍性，也就是说，这些规律应该适用于尽可能多的星星。于是，他开始运用数学方法对第谷遗留的观测资料进行系统的分析和整理。首先，按照第谷生前的嘱托，他花了4年时间集中精力研究火星的轨道。开普勒把太阳、地球和火星看成三角形的三个顶点，用观测火星得到的数据，巧妙地计算出地球的实际轨道。然后，他参照地球的实际轨道，以太阳为中心试算火星的轨道，结果证明：无法取圆周为火星的轨道。接着，他又采用偏心圆和卵形曲线来模拟火星轨道，但一试再试，均未成功。这时，开普勒记起古希腊几何学家阿波罗尼研究过的圆锥曲线——椭圆，意外发现：改取椭圆曲线进行计算，火星轨道便可与第谷的观测数据符合得很好，也就是说，火星轨道不是正圆而是椭圆。至此，开普勒证明了“火星是沿围绕太阳的椭圆轨道运行的，太阳位于椭圆的一个焦点上”。这就是开普勒第一定律，又称为椭圆定律。随后，开普勒又进一步发现了面积定律，即开普勒第二定律：在行星与太阳之间作一条直线，则此直线在行星运行时单位时间内扫过的面积相等。开普勒第二定律表明，行星在轨道上的速率是不均匀的，离太阳越近，行星运行速率越大；离太阳越远，速率越小。开普勒

的这一发现，首次打破了亚里士多德以来一直认为天体只能做匀速圆周运动的观念，使哥白尼日心说与观测结果符合得更好。当时，哥白尼日心说刚提出不久，还很不成熟，正受到宗教界的围攻，开普勒的发现对哥白尼日心说给予了有力的支持。

开普勒一心寻找行星与太阳的距离之间的分布规律，结果意外地发现了椭圆定律和面积定律，但是，他并未以此为满足，而是继续努力寻找自己想找的规律。他坚信宇宙是和谐的，那些反映观测结果的大量数据之间应该存在某种关系。在接下来的长达10年的时间里，他日日夜夜地思索，反反复复地计算、尝试，在1619年的一天早晨，苦熬一夜的开普勒终于发现了这一规律，兴奋不已的他拉住妻子大叫：“亲爱的，我发现了，感谢上帝将你赐给我，我们是和谐的，宇宙也是和谐的，现在都弄清楚了。”开普勒所发现的规律，就是“行星运行周期 $T$ 的平方与轨道半径 $R$ 的立方成正比”，即开普勒第三定律，又称为和谐定律或周期定律。在1619年出版的《宇宙和谐论》一书中，开普勒正式发表了这条定律。后人的研究表明，轨道半径 $R$ ，精确地说，并不是行星与太阳之间的平均距离，而是其椭圆轨道的半长轴。但是不管怎样，开普勒还是基本上正确地给出了这一定律。

开普勒三定律系统地总结了行星运行规律，这是第谷和开普勒合作的成果，是精确的科学观测与严密的数学推算相结合的典范。现在已知的八大行星的数据与开普勒第三定律的

计算也是很吻合的，这证明开普勒定律是很精确的。开普勒三定律的发现对推动天文学和力学的发展起了非常关键的作用。可以说，从开普勒开始，天文学才真正成为了一门精确科学。因此，开普勒获得了“天空立法者”的美誉。

关于天上星星的运动，亚里士多德认为，它们被镶在“九重天”上，随天球绕地球做圆周运动，星星本身是永恒不变的，并不运动。天主教会将亚里士多德学说奉为经典，并指出，是上帝在推动诸天围绕地球旋转。哥白尼不同意他们的看法，认为：天上的星星不是永恒不变的，而是在不断地运动着、变化着；它们不是绕地球做圆周运动，而是和地球一起绕太阳做圆周运动。布鲁诺进一步指出，宇宙没有中心；宇宙中有无数个太阳，每一个恒星都是一个太阳。但是，无论是哥白尼，还是布鲁诺，他们都未能回答：星星如何运动？星星为何运动？是不是上帝在推动它们运动？开普勒发现了三定律，回答了第一个问题。至于第二个问题，他已经意识到，太阳对行星有一种吸引力，这个力随距离的增大而减弱，因为只有这样才能解释为什么离太阳最近的水星其运动速度比金星快、周期比金星短。那么这种推动天上星星运动的力究竟是什么力呢？开普勒始终未能找到答案。后来，牛顿在开普勒三定律的启发下将地上的重力延伸到天上发现了万有引力定律，才完满地回答了这个问题。

（中国科学院高能物理研究所100049）