第七章　近代科学革命(一)

——从抽象的数学理念到数学的实在

就文艺复兴时期的天文学而言，柏拉图的数学天文学占据主导地位，其实质就是用所谓的“数学理念”去“拯救”观察到的经验现象。在这里，真理性的东西是“数学理念”，是造物主的杰作，可错性的东西则是“经验观察”。“数学理念”成了检验“经验观察是否正确”的标准。据此，需要进一步回答以下问题：对天文现象的经验观察真的是错的吗？数学天文学之“数学理念”真的是正确的吗？天体的运动真的不可以违背这样的“数学理念”吗？经验观察到的天体运动真的不能作为天体运动理论的检验标准吗？天体运动的根源何在？难道仅仅是天体灵魂的作用或造物主的推动？等等。另外，就这一时期的物理学而言，占据主导地位的是亚里士多德的哲学的物理学：运用观察方法而非实验方法和数学方法，从事物的等级和内在目的去解释事物的运动变化。由此带来的相关问题是：实验方法和数学方法真的不能运用于物理学中吗？物理学真的只能是哲学的物理学吗？等等。哥白尼、开普勒和伽利略等人对这些问题的回答，构成了近代科学革命的一部分。

一、哥白尼：由新柏拉图主义创立日心说

在哥白尼(Nicolaus Copernicus，1473—1543)所处的时代，从人们所观察到的天文现象，所构建的传统的天文学理论体系，以及所持有的宗教神学思想内涵来看，都是不支持日心说的。在这种情况下，哥白尼为什么会提出“日心说”呢？究其原因，这与他坚持并践行新柏拉图主义有关。

(一)新柏拉图主义的兴起与哥白尼日心说的提出

在文艺复兴时期的佛罗伦萨，重新发现柏拉图思想是一个重要事件。在15世纪左右的欧洲，经人文主义者的研究与传播，柏拉图主义再次流行起来，其思想趋向体现了新柏拉图主义的特征，使新柏拉图主义在西欧得到复兴。

新柏拉图主义的代表人物——希腊晚期的普罗提诺认为，天体的运动是一种“具有专注的自我意识的运动，是理智和生命的运动，完全在自身里面，没有哪一部分在外面，或者在别处”[[1]](#footnote-1)。他认为，天体的运动不是自身的机械运动，而是由灵魂所引导的以神为中心所做的圆周运动。“在天上，只要灵魂具有良好的且比较敏锐的感知力，就会向善运动，同时使身体以相应的方式在空间里运动。反过来，感知力从那高高在上的灵魂获得了善，就欣然去追寻它自己的善，由于善无处不在，因此无论何处它都被引向善。”[[2]](#footnote-2)灵魂向善运动，追求自我完善，这种自我完善的表现之一是做圆周运动。“理智就是这样被推动的。它既是静止的，又是运动的，因为它围绕着他(至善)运动。”[[3]](#footnote-3)所以，宇宙也是如此，既做环形运动，又静止不动。普罗提诺在这里把天体宇宙的运行看作是由灵魂的牵引和推动，而做的追求自身完善的运动，与此相关联的是神秘主义的原因，而不是机械式的物理的原因。

上述新柏拉图主义的思想到了文艺复兴时期有了进一步的发展，呈现出三方面的特征：“第一，在本体论上强调数和形是宇宙万物存在的本质。第二，在数学审美上崇尚三类相互关联的美，即思想上的逻辑美、视觉上的圆形美以及听觉上由数字比例而产生的和谐美，因而强调简单性、对称性、明白性以及和谐性的重要性。第三，宗教方面强调数学设计论。”[[4]](#footnote-4)自然的数学本体论强调的是自然的数的本质；自然的数学美学强调的是自然的简单和谐对称等，这是数学设计论和数学本体论的进一步贯彻和体现；自然的数学设计论强调的是自然的数的本质在宗教意义上的起源，即上帝是一个至高无上的数学家，他按照数学方式设计大自然。“这三方面相互依存。数学审美是数学设计的进一步贯彻和表现。对于数学审美上的强调则来自于设计信仰。”[[5]](#footnote-5)

根据新柏拉图主义，宇宙的本质是简单和谐的，反映在天文学的数学结构上也是简单和谐的；一个能够真实反映天体运动的天文学，应该是一个在数学体系上简单和谐的天文学。以此观之，当时依据托勒密的“地心说”来反映天球运动的数学体系呈现出复杂的状态，存在一定的欠缺：附加的本轮数量太多，数学体系不简洁；偏心圆的设定意味着行星的运动不再以地球为中心；偏心匀速点的设定是为了将偏心匀速点到行星本轮中心连接形成的一条线，在相等的时间内扫过相等的角度，由此，行星本轮相对于偏心匀速点做匀速运动。偏心匀速点是想象出来的，行星本轮的匀速运动是相对于想象中的某个点——偏心匀速点进行的，而不是相对于地球进行的，相对于地球，似乎意味着行星的运动时快时慢，在做着非匀速圆周运动，等等。所有这些都使得天体运动看起来不自然、不和谐，与亚里士多德关于天体运行的“匀速圆周运动”原则[[6]](#footnote-6)相违背，也与新柏拉图主义的观点相冲突。哥白尼认为，托勒密的地心说违背了天球圆周运动的基本原则，但这不是因为他将圆心轨迹引入本轮，以解释行星有时候在天空中好像向后移动，而是因为他为了维持其圆周运动，引入了偏心匀速点，通过一个非圆的中心点来测量，以加速或延缓一个天体的运动从而保持其天体圆周运动。[[7]](#footnote-7)由此，哥白尼对托勒密天文体系之“匀速偏心点”的设立颇为不满，他不能接受这一概念，因此提出一个不需要“匀速偏心点”的天文学体系来。这是一个要建立大胆创新的、简单精巧的天文学体系的想法。

15—16世纪，“具有这种毕达哥拉斯成分的柏拉图主义又在意大利复活了”。[[8]](#footnote-8)博洛尼亚大学的数学和天文学教授诺瓦拉(Maria de Novara，1454—1504)批评托勒密体系“太繁复”，“不合于数学和谐的原理”。而哥白尼正是诺瓦拉的学生，他的这一观点对哥白尼影响很大，并引导他着手构建一个新的、从数学上来看简单明了的体系，也就是后来的日心说体系。[[9]](#footnote-9)不仅如此，“在当时有著作传世的古代人中，只有毕达哥拉斯认为地球是围绕一团中央火运行的”[[10]](#footnote-10)。毕达哥拉斯的这一观念很有可能给哥白尼留下深刻的印象并且深刻地影响了他。与此同时，航海事业获得了巨大的发展，迫切需要更加精确的天文历表。托勒密的“地心说”理论在描述星球运动上却越来越复杂，促使哥白尼变革天文学，提出新的天文学体系，以解决这些问题。

(二)哥白尼提出“日心说”的动机与契机

哥白尼在1543年出版的《天球运行论》(de Revolutionibus Orbium Coelestium)一书的序言中，就说到他试图提出新的天文学体系的动机。他说：“因此我不打算向陛下隐瞒，由于意识到天文学家们在这方面的研究中彼此并不一致，我不得不另寻一套体系来导出天球的运动。因为首先，他们对于日月的运动非常没有把握，甚至无法确定或计算出回归年的固定长度；其次，在确定日月和其他五颗行星的运动时，他们没有使用相同的原理、假设和对视运转和视运动[[11]](#footnote-11)的解释。一些人只用了同心圆，另一些人则用了偏心圆和本轮，而且即便如此也没有完全达到他们的目标。虽然那些相信同心圆的人已经表明，一些非均匀运动可以用这些圆叠加出来，但他们无法得出任何与现象完全相符的不容置疑的结果。另一方面，虽然那些设计出偏心圆的人运用恰当的计算，似乎已经在很大程度上解决了视运动的问题，但他们引入的许多想法明显违背了均匀运动的第一原则；他们也无法由偏心圆得出或推导出最重要的一点，即宇宙的结构及其各个部分的真正对称性[[12]](#footnote-12)。恰恰相反，他们的做法就像这样一位画家：他从各个地方临摹了手、脚、头和其他部位，尽管都可能画得相当好，但却不能描绘出一个人，因为这些片段彼此完全不协调，把它们拼凑在一起所组成的不是一个人，而是一个怪物。”[[13]](#footnote-13)“这一缺陷无法通过有限范围内的轻微修正来消除，而是需要一种全面的修正方法。”[[14]](#footnote-14)

由此可见，促使哥白尼提出新的天文学体系的，是托勒密“地心说”存在的这样一些形式上的不完美以及预测上的不准确等问题。为了解决这些问题，他就一改“地球是宇宙的中心，永恒不动”的观念，代之以“地球在动，太阳不动，‘太阳现在被安放在宇宙的数学中心点附近(实际上并不在正中心)’[[15]](#footnote-15)，其他星球围绕太阳运行”的观念。这后一种观念就是他的“日心说”。“日心说”的提出与“地动说”“太阳中心说”的启发也有关系。

从哥白尼的《天球运行论》中，我们了解到他是知道“地动说”的。他说：“为此，我重读了我所能得到的所有哲学家的著作，想知道是否有人曾经假定过与天文学教师在学校中讲授的不同的天球运动。事实上，我先是在西塞罗的著作中发现，希克塔斯(Hicetas)曾经设想过地球在运动，后来我又在普鲁塔克(Plutarch)的著作中发现，还有别人也持这种观点。为了使每个人都能看到，这里不妨把他的原话摘引如下：

‘有些人认为地球静止不动，但毕达哥拉斯学派的菲洛劳斯相信，地球同太阳和月亮一样，围绕(中心)火沿着一个倾斜的圆周运转。庞托斯(Pontus)的赫拉克利德(Heraclides)和毕达哥斯拉学派的埃克番图斯(Ecphantus)[[16]](#footnote-16)也认为地球在运动，但不是前进运动，而是像车轮一样围绕它自身的中心自西向东旋转。’

因此，从这些资料中获得启发，我也开始思考地球是否可能运动。尽管这个想法似乎很荒唐，但我知道既然前人可以随意想象各种圆周来解释天界现象，那么我认为我也可以假定地球有某种运动，看看这样得到的解释是否比前人对天球运行的解释更加可靠。”[[17]](#footnote-17)

不仅如此，古希腊人阿里斯塔克认为，静止于宇宙中心的天球不是地球，而是太阳；地球每日依自己之轴自转，每年沿圆周轨道绕日一圈，其他行星也以太阳为中心绕日运转。

所有这些思想家们的“地动说”和“太阳中心说”的思想被哥白尼所吸收，作为他的思想起点。

在当时，一些新柏拉图主义者以“太阳神”为宇宙的中心。受此启发，“哥白尼还引用隐士的文献，以太阳为‘可见的神’[[18]](#footnote-18)”[[19]](#footnote-19)。如果太阳是“可见的神”，那么它作为宇宙的中心应该就是理所当然了，因为只有这样才与它作为神圣的标志相符。也许如此，哥白尼提出：“太阳的王位雄踞在所有位置的中心。在这个最为壮美的殿堂里，我们还能把这个光芒四射的天体放在更好的位置使它可以立刻普照万物吗？他有权被称为神灯、心灵、宇宙的立法者；赫尔墨斯称他为看得见的上帝，索福克勒斯笔下的艾勒克塔称他为全视者(All-seeing)。所以太阳坐在神圣的王座之上，号令他的孩子，那些绕他转动的行星。”[[20]](#footnote-20)“这种太阳神的思想似乎给哥白尼科学的灵感，他的话确实表明他受太阳神观念的影响。”[[21]](#footnote-21)

更重要的是，哥白尼提出的“日心说”，还在于它比“地心说”更加简单和谐，更能体现新柏拉图主义。比较哥白尼的“日心说”和托勒密的“地心说”：一方面，前者不仅能够更加详尽地解释后者所能解释的现象，而且还能够解释后者所不能解释的许多显而易见的天象，如逆行的时间、次数和范围，以及彗星的出现等，在物理原因上，前者具有优势；另一方面，前者在几何结构以及对内行星的解释上，要比后者简单明了，在某些情况下不必借助本轮就可以解释行星的相关运动，在数学原因上，前者也具有优势。

事实上，到了15、16世纪，天文现象的观测精确度已经有了很大提高，观测到的天文现象也越来越多，当时，为了使托勒密的学说与这些观测结果相吻合，就不得不在本轮之上加上第二个本轮、第三个本轮……最后本轮、均轮的总数达到79个(另一说法是80个)。而哥白尼采用“日心说”，只用了34个本轮-均轮模型就取代了托勒密的79个(或80个)本轮-均轮模型，更有效地“拯救现象”，解决了托勒密“地心说”所面临的诸多难题。

哥白尼认为，他的天文学体系与托勒密的天文学体系相比，有两方面的数学审美优势：一是摒弃了托勒密的偏心匀速点，运用较为简洁的方式定性地解释了重要的行星不规则运动；二是首次为地球以及所有行星天球确立了轨道次序，并且“我们在这种安排中发现宇宙具有令人惊叹的对称性，天球的运动与尺寸之间有一种既定的和谐联系，这用其他方式是无法发现的”[[22]](#footnote-22)。

这里可以以金星为例加以说明。金星之所以被看成晨星或晚星，是因为它的位置要么在太阳前面一点点，要么在太阳后面一点点，但永远不能像外行星那样，偏离太阳180度。在这种情况下，托勒密体系只有通过强行假定金星与水星本轮的中心永远固定在日地连线上，见图7.1(a)，才能解释这一点，即水星和金星的均轮像太阳一样每年绕地球旋转一周。而在哥白尼的体系中，只需假定金星和水星的轨道位于地球轨道内部即可，见图7.1(b)。显然，哥白尼日心说要比地心说更简单地解释金星运动。



图7.1　哥白尼日心说要比地心说更简单地解释金星运动[[23]](#footnote-23)

对于自己创立的“日心说”，哥白尼评论道：“通过假定地球具有我在本书中所赋予的那些运动，经过长期认真观测，我终于发现：如果把其他行星的运动同地球的轨道运行联系在一起，并且针对每颗行星的运转来计算，那么不仅可以得出各种观测现象，而且所有行星及其天球的大小与次序都可以得出来，天本身是如此紧密地联系在一起，以至于改变它的任何一部分都会在其余部分和整个宇宙中引起混乱。”[[24]](#footnote-24)

根据上述哥白尼自己的评论可以知道，他之所以提出并坚持“日心说”，就在于此数学体系的简单和谐，并进而反映了新柏拉图主义的“天体运动的简单和谐”。正是在这一意义上，伯特(Edwin Arthur Burtt，1892—1989)说道：“对哥白尼来说，向新世界观的转变只不过是在当时复兴的柏拉图主义的激励下，把一个复杂的几何迷宫在数学上简化成一个美妙和谐的简单体系。”[[25]](#footnote-25)

不仅如此，哥白尼之所以提出“日心说”，还与他对上帝的热爱有关。他认为，自然是神性和谐的，造物主是完善的并且创造出美的宇宙万物，这种美和善就是宇宙的简单和谐。又由于宇宙的简单和谐与数学的简单程度成正比，因此，对后者的追求，就成为对宇宙秩序的追求，这也是对上帝伟大荣耀的体现和赞美。当被问到为什么会创立“日心说”时，哥白尼说道：“我将试图——这有赖于上帝的帮助，否则我将一事无成——对这些问题进行更广的研究，因为这门技艺的创始者们距离我的时间越长，我用以支持自己理论的途径就越多。”[[26]](#footnote-26)这表明，引导并支撑哥白尼提出“日心说”的绝非仅仅是纯数学，与数学、宇宙和谐相连的神学目的论也是哥白尼提出“日心说”的最深层次动机。这种把数学和宇宙以及神学统一起来的数学哲学思想，正是新柏拉图主义的思想内涵。

(三)哥白尼“日心说”“正确”的含义

有一个问题需要说明，依据新柏拉图主义构建出来的“日心说”，其正确性如何保证呢？根据日心说，地球是在动的，但是直观告诉我们，地球并不动，这又是怎么一回事呢？哥白尼回答了这一问题：“我们是在地球上看天穹周而复始地旋转，因此如果假定地球在运动，那么在我们看来，地球外面的一切物体也会有程度相同但方向相反的运动，就好像它们在越过地球一样。特别要指出的是，周日旋转就是这样一种运动，因为除地球和它周围的东西以外，周日旋转[[27]](#footnote-27)似乎把整个宇宙都卷进去了。然而，如果你承认天并没有参与这一运动，而是地球在自西向东旋转，那么经过认真研究你就会发现，这才符合日月星辰出没的实际情况。”[[28]](#footnote-28)

而且，即使不考虑上面这一点，从新柏拉图主义的视角看，也是可以认定“日心说”有一定道理的。因为，在新柏拉图主义看来，感觉到的地球运动可以是虚假的、易变的，由此经验观察不能作为真理的存在，进而作为天文学真理的判据；作为天文学真理判据的只能是经验世界背后的数学理念世界。数学理念世界才是真实的、永恒的，是我们的感官知觉达不到的，甚至与我们感官知觉到的物理实在相矛盾。将新柏拉图主义这种理念运用到哥白尼的“日心说”，就是：“日心说”的提出主要不是以观察事实为基础并作为检验标准的，而是以新柏拉图主义作为思想原则，在没有被观察资料充分佐证之前，以天体运动的数学简单性和和谐性为标准，对天球的运动进行调整的结果。相比于其他的天文学知识体系，越是简单的、和谐的，并且能够用来解释更多的天文学现象的天文学几何体系，其正确性越能得到确认。这就是数学天文学的核心要旨，也是数学天文学“拯救现象”的内涵。它告诉我们，即使这样的几何结构缺乏足够的观察经验事实支持，人们也可能会接受这样的数学结构以及其所内含的假定。按照上述思想衡量哥白尼的“日心说”，“由于他的日静说[[29]](#footnote-29)除了像托勒密的理论一样精确地解释了所有的天象观察以外，还解决了每个行星在运动时每年都会出现的一直都没有得到解释的内容(当然，这是对地动说的挪用)，同时也由于他的日静说在确定每个行星的位置方面提供了一个简单易行的手段(托勒密的论述则有些武断)，于是，哥白尼相信他的体系在物理学方面肯定是真实的”[[30]](#footnote-30)。“哥白尼坚信，地动说不论怎样地抵触了自然哲学，也必定是真的，因为这是数学所要求的结果。这一点是革命性的。”[[31]](#footnote-31)

当然，如此说“‘日心说’正确”，更多的是在新柏拉图主义的意义上说的，而非在观察经验的意义上而言。伽利略就说：“按照哥白尼的看法，一个人必须否定自己的感觉。”[[32]](#footnote-32)不可否认，哥白尼的“日心说”，是体现了宇宙的简单和谐和数学审美方面的特征的[[33]](#footnote-33)，但是，由于“日心说”与日常经验(如地球静止、太阳东升西落、浮云不动等)不符，而且还与当时占主导地位的“地心说”相对立，所以它就更多地具有数学意义而不具有感性意义，很难被当时的天文学家和神学家接受。“在十六世纪中只有新柏拉图主义者无保留地接受哥白尼主义。”[[34]](#footnote-34)“在这新系统以外的主流科学家直到一百年后的伽利略时代才开始接受日心论，而且直到牛顿时代日心论才有机制的解释，在这些发展以前整个日心主义的争论都是完全根据宗教上和哲学上的论据。”[[35]](#footnote-35)

从上面的论述可以看出，哥白尼之所以提出“日心说”，原因有二：一是受到前人如阿里斯塔克的“地动说”和“太阳中心论”的启发，以及通过运动相对性原理可以推出地球可能运动；二是其与托勒密天文学体系相比，有数学上的审美优势，而且能够更加方便地解释更多的天文学现象，更充分地体现了自然的神性和谐，遵循和体现了新柏拉图主义。可以说，这第二个原因是更加直接的、更加深刻的原因，也是哥白尼提出“日心说”最为重要的原因。“新柏拉图主义为哥白尼革命搭好了概念舞台。”[[36]](#footnote-36)

(四)哥白尼“日心说”的意义

“日心说”的提出意义是重大的。从科学上说，哥白尼批判了托勒密的理论，阐明了天体运行的现象，推翻了长期以来居于统治地位的“地心说”，实现了天文学的根本变革。从宗教上说，“日心说”虽然与“地心说”都是建立在柏拉图数学天文学的信念之上，但是，它客观上否定了千百年来被奉为定论的宗教神学的核心理论基础“地心说”，对宗教神学是一个沉重打击。在科学方法论上，它启发我们，一种富含宗教神学观念的自然哲学，也是做出科学发现的重要理论基础，新柏拉图主义之于哥白尼“日心说”的提出，就是如此。哥白尼“日心说”的提出主要不是基于表象，而是基于理性的建构；表象有可能是错误的，一个人必须运用理性，透过表象，才能达到真实。我国有学者就说：“与其说理性最终导出了日心学说，不如说日心学说最终彰显了理性在人类认识世界中的地位。理性的至高无上的权威由是确立。从此以后，理性成了人类思维活动的唯一被认可的主导。正是在这一意义上，日心学说的建立开辟了人类认识世界的一个新纪元。”[[37]](#footnote-37)

传统的观点认为，哥白尼的日心说相对于托勒密的地心说是一次革命。现在，有少数学者持有相反的观点，认为哥白尼的日心说并不是一次天文学革命。理由如下。

第一，他所持有的最终的原则与托勒密的相同，即造物主创造这个世界的基本原则是简单的和和谐的，由此使得他构建日心说的基本原则与地心说一致。

第二，他在各方面都是保守的，如他模仿托勒密的演讲风格，依靠托勒密的观察，使用托勒密的数学技巧(除了均衡点)；他拒绝使用均衡点，原因是它违背了古希腊的原则；他完成日心说著作后约30多年，才交由出版机构出版问世；他把他理论的创新归于古代的希腊权威，而不是他自己。

第三，在出版的《天球运行论》序言中，他称这本书的结论只是假设性的，而不是对世界体系的真实描述。

应该说，上述理由都是事实，但是并不能充分说明哥白尼的日心说不是一次革命。

第一条理由表明哥白尼的日心说相对于地心说并不是一次“大写的科学革命”，而是一种在最基本的自然观一致基础上的“小写的科学革命”。鉴此，宗教神学可以在坚持最终的自然观原则——“上帝创造这个世界是简单的和和谐的”基础上，最后承认日心说的正确性。话虽如此，但是，鉴于当时的社会环境，哥白尼提出日心说还是需要足够的勇气的，因为一旦涉及乃至接受日心说，就意味着地球可能不是宇宙的中心，天上的星球可能并不围绕地球运转，也就进一步意味着宗教教义可能就是错的，这对宗教神学是一个打击。就此而言，日心说不单纯是一次天文学革命，还是一次宗教神学革命。

对于第二条理由，表面上看来是支持“哥白尼是谨慎的”这一观点，但是，深入分析之后未必尽然。他之所以模仿托勒密的演讲风格，依靠托勒密的观察，以及使用托勒密的数学技巧，是因为他考虑到他的天文学同伴都习惯使用托勒密的喜好，这样做可以让他们更好地跟随他。[[38]](#footnote-38)他之所以根据古希腊的原则拒绝使用托勒密的均衡点，是由于与他同时代的人们相信，与亚当越接近的古人所知道的东西比他们所知道的东西越多，如此，诉诸古希腊哲学家，就可以更好地说服他的同时代人相信他的系统的真理性。[[39]](#footnote-39)而且，有学者认为，哥白尼坚信真实的天体匀速圆周运动是不需要均衡点这样的假设作为工具的，由此也反衬他认为他的日心说是正确的。[[40]](#footnote-40)至于他之所以推迟30多年才出版他的著作，并没有证据表明这是由于他的保守，而是有证据表明他一直在努力改进这本书。[[41]](#footnote-41)

对于第三点，根据当今越来越多科学史家的研究，《天球运行论》的序言是在哥白尼不知情或未经他允许的情况下由他人代写的，事实上，他相信日心说是正确的。[[42]](#footnote-42)结论是：“他的工作有两个主要方面表明他是一个非常明确的革命思想家：第一，他的目的是恢复宇宙学的科学，而不仅仅是提出另一个数学体系；第二，他认为数学胜过物理，坚持认为地球必须是运动的，因为数学要求它，尽管他不能对地球是如何运动的给出物理解释。”[[43]](#footnote-43)

应该注意，虽然哥白尼提出了日心说，比较完美地克服了托勒密地心说的困难，但是仍有两个大的问题需要回答：第一，如果各星球都围绕太阳运动，则其运动状态如何？第二，在新柏拉图主义的背景下，数学如何可能运用于地上物体的运动？开普勒和伽利略分别对这两个问题进行了探索。

二、开普勒：开创了物理的数学天文学

如前所述，哥白尼是在坚持新柏拉图主义的基础上创立“日心说”的。他为开普勒时代的人们留下了几个问题：“日心说”成立吗？成立的理由是什么？如果“日心说”是正确的，那么围绕太阳运行的行星数目是多少？为什么会有这么多的行星数目？行星是如何围绕太阳运行的？它为什么会这样围绕太阳运行？开普勒(1571—1630)对这些问题给出了自己的思考，他赞同哥白尼的日心说，接受宇宙“简单和谐”的哲学理念，运用数学方法构建天球运行模型，提出“开普勒三定律”，以最终体现这种“和谐”。

开普勒是如何做到这一点的呢？国内外一些学者给出了相关解答。斯蒂文森(Stephenson)认为：“开普勒的工作太有独创性了，甚至连天文学的主流也无法轻易吸收，而科学本身也发展得太过发达，他的新理论无法偏离自己的轨道。这更是因为他的理论中的天文学被嵌入了一个物理推测、原型(archetype)[[44]](#footnote-44)推理和调和狂想曲的矩阵中，这使得其他科学家发现这些矩阵几乎无法理解。”[[45]](#footnote-45)科兹罕特丹(Job Kozhamthadam)说道：“在宗教上，开普勒认为，上帝是宇宙的创立者，他按照简单的、理性的、几何的、活力论的、音乐和谐的思想创立这个世界；在哲学上，即在认识论和方法论的原则上，开普勒坚持实在论、量化、因果性、充足理由、秩序、统一、和谐、简约和简单性。这两者在开普勒第一定律、第二定律的形成和辩护中起着整合性的作用。如因果性原则导致开普勒思考各种运动的原因，简单性原则使得他宣称哥白尼体系优于托勒密体系。”[[46]](#footnote-46)科学史家格德斯坦(Goldstein)指出，开普勒的“新天文学”的“新”体现在“逻辑”“神学”“目的”“假设”“规律”“标准”六个方面：在逻辑上，它不是描述性的，而是因果性的，这样的因果性不单纯表现为力，而且还表现为原型；在神学上，它不是圣经中的神学，而是结合了圣经的“三位一体”的原型；在目的上，它不是去反映光学上的角速度关系，而是探寻行星的轨道；在假设上，他对天文假设与几何假设作了严格区分，如“月亮轨道是卵形(oval shape)”属于天文假设，而“用复合圆来解释卵形”则属于几何假设；在规律上，开普勒认为支配行星运动的是距离与速度的关系，不是光学上的角速度关系；在标准上，开普勒认为行星运动规律与观测结果一致的标准是与原型一致，距离与速度的关系中距离优先。[[47]](#footnote-47)我国学者总结道：在开普勒看来，上帝作为万物的起源，是按照自己的计划即原型创造世界的，由此使得创造物与上帝在本质上相一致，有着数学的和谐；这种数学的和谐决定了，从结构上看，宇宙就是几何的，从物理运动上看，宇宙就是一台和谐运转的机器；数学的和谐是原型的内在本质，物理的证据是原型的反映，通过原型的反映寻找原型的影子，从而为相关天文学假设提供物理上的证据，通过数学的论证揭示原型的本质，并且说明天球运动上的数学的和谐。原型为开普勒提供了一个演绎推理的公理基础，一个为自己的新天文学辩护的理由，一个把数学天文学与物理天文学有机结合起来的理由，由此就使得星球的运动物理上真实，数学上美感，原型上和谐。[[48]](#footnote-48)

应该说，上述学者对开普勒科学思想的揭示有一定道理。这些在开普勒的思想观念及其科学发现中得到了体现。

(一)运用原型为哥白尼日心说辩护

“原型”是开普勒之所以为哥白尼日心说辩护的根本原因，而从数学天文学的角度为哥白尼的日心说进行辩护，是他所采取的具体路径。他在《宇宙的奥秘》(Mysterium Cosmographicum，1597年)一书的序言中说：“特别地，我一直探求为何事物的三个原因——数目、尺寸以及圆周运动是这样而不是那样，我大胆地认为，之所以如此，是因为静止的太阳、恒星天球和二者之间的空间与圣父、圣子、圣灵之间存在着巨大的和谐。我将要在我的宇宙论中详细地研究。”[[49]](#footnote-49)开普勒认为，哥白尼的日心说是有道理的，上帝是完美的创造者，他创造的东西也是完美的，这样的完美不仅在于自己的形象——“三位一体”的球形结构，即圣父在中心，圣子在球面，圣灵在中心与球面之间，而且还将这样的完美形象赋予宇宙——太阳在宇宙的中心，对应圣父；恒星天球在球面，对应圣子；充斥在宇宙的其他各个部分，对应圣灵。这样一来，哥白尼的以太阳为中心的球形结构，就与“三位一体”的上帝形象相对应。

有关太阳行星的数目，开普勒也从原型上找到了解释。根据哥白尼的日心说，太阳周围的行星的数目是6个，为什么是6个呢？开普勒认为，这是出于原型的理由，即上帝创造的这个世界是和谐的，这种和谐体现在日心说上，就是“五个正多面体[[50]](#footnote-50)的体系能够嵌入六颗行星的天球之间，这便是行星的数目是六的原因”[[51]](#footnote-51)，见图7.2。

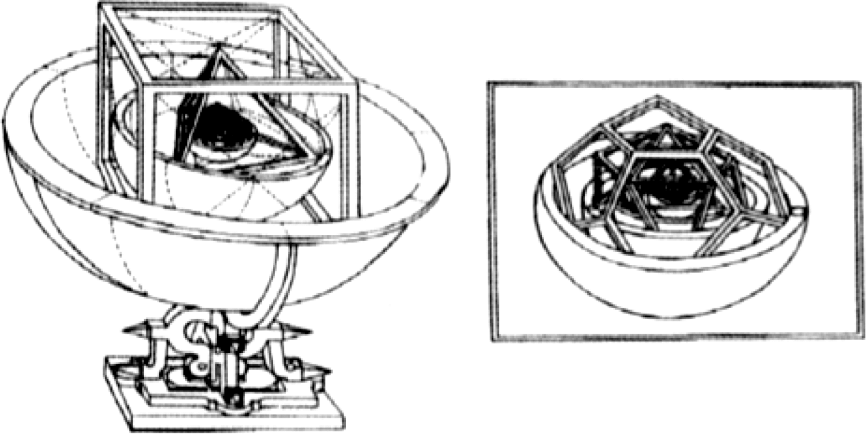


图7.2　开普勒的宇宙模型[[52]](#footnote-52)

根据图7.2，开普勒设想此体系结构如下：如果把一个六面体内接于土星天球(即以太阳为中心的球，土星轨道位于球上)，那么这个六面体的内切球将是木星天球。再把一个正四面体内接于木星天球，则该四面体的内切球将是火星天球。以同样的方式进行下去，则十二面体、二十面体和八面体的内切球将依次为地球天球、金星天球和水星天球。行星之所以有六颗，恰恰是因为六个同心球提供了五个居间，可以依照上述方式嵌入五个正多面体。[[53]](#footnote-53)“开普勒确信这绝不可能出于偶然，认为他已经部分揭示了上帝的创世设计的奥秘。”[[54]](#footnote-54)

这从原型的角度或从终极因的角度，在哥白尼的日心说中找到了原型上的数学和谐，并从原型的意义上回答了开普勒的“为什么天体的运动轨道的数目、大小和运动就是那个样子，而不是别的样子”这个问题。

在上述思想的基础上，开普勒认为，哥白尼的世界体系不仅能从观察数据上归纳出来，而且也能从原型的结构中推演出来，后者要比前者优越得多。他在《宇宙的奥秘》的第二章评价道：“哥白尼，像一个靠手杖走路的盲人一样(正如雷蒂库斯(Rheticus)本人过去所说)，通过观察的结果，靠侥幸而不是靠可靠的推测，归纳得出被认为是正确的东西，而所有这些东西从原因和创造物的原型中，靠演绎推理也能完全正确地得出。可不可以设想，多面体模型演绎的结果要比哥白尼归纳出的结果好得多，或令人信服得多。”[[55]](#footnote-55)由此来看，许多人认为开普勒是新柏拉图主义者，还是有一定道理的。柯瓦雷就说：“首先，开普勒想要的是找到上帝头脑中支配宇宙的结构性定律(他称为原型定律)，而且这些定律只能是数学的，或确切地说是几何的。其次，他想要的是找到一个能保持结构完整，或者说在运动中能整合在一起的上帝用的物理(动态的)方法。”[[56]](#footnote-56)

(二)天文学理论要与观察的现象相一致

在传统的数学天文学那里，天上的世界与地上的世界是不同的，天上的世界是由以太构成的，沿着一定的轨道做匀速圆周运动；如果人类对星球的观察不符合这一点，不是上述观点错了，而是人类的观察出了问题。

开普勒不同意这种观点。他认为，创世和谐说是没有问题的，但是，人类关于世界和谐的一些看法是有可能出错的。第谷(1546—1601)和其他人对1572年的新星和1577年的彗星进行了仔细观察，发现这两者皆位于月界以下。那么问题来了，它们是由什么构成的呢？根据亚里士多德的理论，天球是完美的并具有不变性，是由一种不同于月下世界的组成元素——以太构成的。它们是星球，应该由以太构成。但是，现在的观察表明这两种星球又位于月下世界，应该不由以太而是由月下世界的四种元素——水、火、土、气构成。如此，由上述观察就不能必然得出“星球是由以太构成的”这一结论。这促使开普勒不得不放弃以太天球的观点以寻求别的解释。他逐渐认识到，观察到的自然宇宙的事件是对基本的、简单的数的关系的例示，观察到的现实世界很可能是真实的。

既然观察到的现实世界有可能是真实的，那么，面对这一世界，我们该如何对待呢？开普勒认为，它应该要由简明的数学体系来证明，并由此体现世界的和谐。或者说，天文学上的数学必须要有物理上的基础，说明并解释着真实的物理世界。就此，开普勒的天文学就与柏拉图的数学天文学不一样，它不仅要揭示星球的真实数学结构，用数学的和谐来解释人们观察到的天文现象，还要使得理论与观察到的现象相一致。如果不一致，就去寻找并发现与观察事实相一致的、新的数学和谐理论，而不是将一些先验的、与观察事实相违背的理论强加于对自然界的解释上。

这就说明，开普勒的思想在发生变化，由强烈的“原型”主义者，转变为将“原型”、数学解释、观察到的天体运动这三者完美地结合在一起，来说明天球的运动。由此，开普勒的天文学被称为“物理的数学天文学”。

(三)将物理的、数学的和原型的思想结合起来

物理的、数学的和原型的完美结合充分地体现在开普勒的行星运动三定律之中。

1. 开普勒第一定律——椭圆定律的创立

椭圆定律的创立与“8′误差”的解释密切相关。所谓“8′误差”，指的是第谷的火星观测数据和根据托勒密的对位点偏心圆模型所计算的数值之间不一致，即1.133度(这个角度相当于表上的秒针在0.02秒瞬间转过的角度)，存在着“8′误差”值。开普勒认为，第谷的观测没有问题，应该是对位点或者是偏心圆有问题。开普勒相信物理的真实性，对位点[[57]](#footnote-57)的存在能很好地解释火星的距离与速度的变化，即行星运动的不均匀性，并且在与太阳对称的位置上推导出的偏心距离误差较小。因此，他就很难认为对位点存在是错误的而放弃对位点。他后来研究地球轨道时发现地球轨道也像其他星球同样存在着对位点，这就更加坚定了他的“对位点普遍存在”的物理思想。如果对位点是普遍并真实存在的，则可能出现问题的就是“偏心圆”，即“地球的圆周运行轨道”可能有误。有了这一想法后，开普勒通过计算日地之间的距离，以确定地球的轨道形状，最后得出的计算结论是 “地球的轨道是卵形的”。尽管如此，他仍然不敢贸然相信并接受这一点，毕竟，“理想的行星圆周运动”是2000多年以来根深蒂固的观念，被看作是宇宙和谐的典型特征，而这也符合开普勒的原型原则。

从1604年开始，开普勒再次对火星轨道展开研究，很快他就发现其轨道的形状也不是圆形，而是卵形。而且他认为，其卵形的形成是由于行星体内有一种理智或精神(mind)，使其在本轮上做完美的圆周运动，同时在外部太阳力的作用下推动行星做非匀速运动。卵形运动轨道就是这两种力共同作用的结果。不过，卵形轨道难以在物理上和数学上得到统一，这导致开普勒困惑于此长达4年之久。之后，他对这种卵形轨道的数学规律进行研究，发现根据圆形计算的距离比观测结果要大，而根据卵形计算的距离要比观测值小，如此，行星的轨道应该是位于圆形与卵形之间。最后，他通过计算及其几何建构，得出“火星的轨道是椭圆的”结论。[[58]](#footnote-58)

由此，第谷的火星观测数据和根据对位点模型所计算的数值之间的“8′误差”，最终使开普勒抛弃了沿袭2000多年的“星球圆周运动”观念，提出开普勒第一定律，即所有行星围绕太阳的轨道都是椭圆的。

开普勒之所以提出行星运动的椭圆轨道，还与以下两方面的因素有关。

一是他收集到第谷的肉眼观察资料(他是当时最精确的)和火星轨道的刻画，注意到火星在亮度和速度上的变化并且它的形状是椭圆形或鹅卵形，很显然这时轨道不可能是圆形和匀速的。

二是他还意识到太阳光的散发随着距离的增加而变得越来越暗。他想到，对此的解释，与其说行星灵魂产生了运动，还不如说太阳发出另一种类似于光的“力”(vis，force)，这种“力”是“有形的但非物质的”(corporeal but immaterial)。受到吉尔伯特的影响，他在书中描述了地球和包括太阳在内的其他行星在相反的轴上有磁极。他推断，当行星绕太阳旋转时，如果它们各自的极性相反，导致它们被吸引或排斥，这就可以解释轨道为何偏离圆周形状和匀速运动。由此，他得出结论，这两种力[太阳的辐射(emanation)引起行星运动的力以及差异明显的吉尔伯特的磁力(contrasting magnetic forces)]，可以解释观测到的行星鹅卵形或椭圆形的运动。但是直到他测量了火星轨道从圆形到椭圆形产生的半径偏差为0.00427，他才最终确信轨道一定是椭圆的。

事实上，开普勒并未放弃原型的原则。开普勒从两个方面来证明椭圆不仅具有原型上的优点，而且还符合物理的原则：第一，椭圆与圆有着必然的联系，两者有着天然的、和谐的几何关系；第二，椭圆能够解释行星的物理振荡运动。也许正因为如此，“不难理解，为什么开普勒一有了行星的轨道是椭圆的念头之后，就不管仍然存在的一些误差和物理上难以解释的缺陷，而欣然接受行星的轨道是椭圆。如果不从原型的角度来理解，就难以理解对卵形接受与椭圆接受的开普勒的心理反差。在这里，开普勒一方面探讨行星的物理机制，一方面又定量地计算行星的和谐的数学关系，所以，可以认为原型的思想指导开普勒去发现行星物理机制背后的和谐的数学关系，并剔除了一些数量上的障碍”[[59]](#footnote-59)。

霍尔顿(Gerald Holton)对开普勒的上述思想和策略作了概括。他认为：“开普勒论证的有效性事实上是来源于许多完全不同的因素平行的作用结果。我们发现，当他的物理学分析方法失败时，他的形而上学就会来救助；当他的机械模型解释失败时，他就用数学模型来解释；当这两者都失灵时，他就采用神学的原则。”[[60]](#footnote-60)如此，“原型”在开普勒那里仍然是最重要的。不仅如此，开普勒还认为：“宇宙是物理的机器，宇宙是数学的和谐，宇宙是神学的根本秩序。”[[61]](#footnote-61)这应该是开普勒新天文学的思想基础。

2. 开普勒第二定律——面积定律的创立

对于行星的运动，人们很早就发现其运动的不均匀性。它主要表现在两个方面：一是每个行星在各自不同的轨道上以不同的速度运行；二是同一个行星在轨道的不同位置速度也不相同。

如何看待这两方面的不均匀性呢？对于开普勒之前的数学天文学家如托勒密和哥白尼等来说，这样的不均匀性并不是真实的，真实的应该是它们的种种匀速圆周运动，因为只有这样才符合柏拉图意义上的“天体和谐”。

对于开普勒来说，情况并非如此。他认为，行星在远日点运动慢，在近日点运动快，这是事实，应该尊重。既然如此，是什么原因造成这一点呢？应该是太阳，太阳在等级上要比地球高，在太阳的内部隐藏着神圣的、与我们的灵魂相类似的东西，如此，使得它正如不动的推动者(the unmoved mover)，成为像上帝那样的类似物，不被创造却创造他物，尽管在有形的这一点上与上帝不同。[[62]](#footnote-62)

太阳是如何推动行星如此这般地运动的呢？在开普勒那里，“他相信大自然是统一的，试图通过地界力学所使用的原理来解释现象”[[63]](#footnote-63)。在《宇宙的奥秘》一书中，他认为，太阳具有驱动活力(moving spirit)或者是驱动灵魂(moving soul)，很可能就是它推动着行星运动。他之所以提出这一观点，主要原因在于他认为，在哥白尼体系中，太阳的功效绝不只位居宇宙的中心和照亮整个宇宙系统，它很可能也是推动行星运动的原因，否则，它何以自居中心。不仅如此，他还认为上述观点有一些“事实”支持，如行星的轨道面与太阳相交意味着行星的轨道是受太阳控制的；行星距离太阳越近，运动速度越快，距离太阳越远，运动速度越慢。[[64]](#footnote-64)“太阳辐射力的效果应当随着距离的增大而成比例地减小，每颗行星的速度应当与太阳的距离成反比。”[[65]](#footnote-65)

进一步的问题是，这种推动力与行星距离太阳的远近、运动的速度有什么样的关系呢？为了找出这种关系，开普勒在1605年读了吉尔伯特关于磁铁的论述后，受到启发，作了物理的类比。他说：“我的目标是证明，天空机器不像一种神圣的生物，而是像一个时钟(那些相信时钟有生命的人把工匠的光荣分配给了作品)，只要运动的一切差异都是由一种最简单的、磁性的、物质的力引发的，就像时钟的一切运动是由一种简单的重物引发的那样。我也将证明，这一物理的解释将经得起数学和几何的检验。”[[66]](#footnote-66)据此，他将太阳作为具有磁灵魂那样的东西，射出的原型物可能是磁性丝状物(magnetic fibres)，它推动行星就像地球推动月球运动一样。[[67]](#footnote-67)“因此，我们必须确立以下两个事实中的一个：要么(行星的)施动灵魂(animae motrices)随着与太阳距离的增加而减弱，要么只有一个施动灵魂位于所有轨道的中心，即太阳。物体越接近它，它所产生的推动作用就越强，而对于更远的物体，它会因为距离遥远以及(随之的)力量减弱而变得无效。”[[68]](#footnote-68)不仅如此，他认为：“正如太阳是光的源头一样，处在中心的太阳也是天球共同的原点。生命也是如此，宇宙的灵魂和运动源于太阳，以便将静止赋予恒星，将运动的次级推动力赋予行星，但是，将原动力赋予太阳。同样太阳以其美丽的外表、有效的动力、灿烂的光辉远远超过其他一切事物。”[[69]](#footnote-69)

换言之，当行星在自己的轨道上围绕着太阳运动时，如果离太阳较近，太阳的活力就较强，运动速度就较快；如果离太阳较远，太阳的活力就越弱，运动速度就越慢。“太阳活力是行星离太阳距离远近的物理原因，同时也是宇宙秩序形成的物理原因。”[[70]](#footnote-70)

从前面所引的开普勒的一段话中可以看出，他将太阳驱动力与光作了类比。据此，有学者认为，根据光学知识，光的衰减与距离的平方成正比，所以开普勒认为驱动力的减弱可能与距离的平方成正比，甚至可能是立方。[[71]](#footnote-71)另外一些科学史家也持有类似的观点，认为开普勒就是根据“距离与太阳驱动力可能是简单的反比关系”得出平方反比定律的。这种观点，可以从开普勒的下面一段话中得到佐证：“不管怎样，我们现在必须考虑建立我们所需要的轨道比的方法。如果天球厚度是唯一使行星周期增加的原因，那么在运动和平均距离之间就会存在着同样的差别。……可是不管怎样，这种运动的比值意味着越远的行星驱动活力越弱。因此，我们还必须发现，这种运动关系与活力的弱化存在什么样的关系。那么，我们不妨假设，很可能太阳分配的这种运动与光的比例一样。”[[72]](#footnote-72)

到了1609年，开普勒的《新天文学》(*Astronomia Nova*)[[73]](#footnote-73)一书出版，上述“太阳驱动力”的思想得到更加充分的体现。该书的第32章谈到在一个圆上推动行星的力随着离太阳越远而变弱；第33章证明了这种力只能在太阳体内；第34章推测太阳是一个磁体，能够自转；第35、36章论述了太阳力传播的方式等。通过这样的研究，开普勒概括性地论述了两种力以及它们是如何推动行星运动的。[[74]](#footnote-74)

一种力是太阳发出的推动力，它导致行星围绕太阳旋转。太阳光芒四射并绕自身轴心旋转，太阳赤道发射出非物质的线或力线的形式——辐条，它就像风扇或螺旋桨一样随着太阳一起旋转。如果一颗行星处于太阳旋转的漩涡内，这些力线就会穿过这颗行星并使它运动。太阳创造了风车效应，辐条旋转通过。行星越靠近太阳，每分钟穿过行星的辐条就越多，因而行星的运动就越快。

另外一种力是推拉行星的力。这后一种力应该就是吉尔伯特所发现的磁力。在《论磁体》一书中，吉尔伯特提出，地球是一个以南北两极作为磁极的巨大磁体。受此影响，开普勒猜测太阳和所有的行星都可能是磁体，具有那时所认为的那样一种特殊的、有价值的、非物质的磁力，它们作用于太阳或行星，使得行星靠近或者远离太阳运动。具体而言，太阳只有一个磁北极，地球具有磁南极和磁北极。当地球的北半球处于夏天时，地球的轴线向太阳倾斜，所以磁北极比磁南极更靠近太阳，这时太阳表面遍布的磁北极会产生一种同性相斥的作用，造成地球在它绕轨道运动时慢慢远离太阳。当地球的北半球处于冬天时，磁南极更靠近太阳，这就会产生一种异性相吸的作用，从而拉近地球在它持续绕轨道运行时靠近太阳。这种研究的历程充分体现了开普勒的思想——“天文学理论绝不仅仅是说明观察现象的一套套数学方法，它也必须依赖于合理的物理学原理，从导致行星运动的原因推知行星的运动。”[[75]](#footnote-75)结果就是，用对位点模型解释了距离定律，用变速运动代替了匀速运动，距离定律最终发展成“面积定律”，即“开普勒第二定律”——行星和太阳的连线在相等的时间间隔内扫过相等的面积。[[76]](#footnote-76)

在《新天文学》一书的序言中，开普勒也说：“本书中，我的目的主要是改革三种形式的天文学理论[[77]](#footnote-77)(特别是火星运动的理论)，以便我们根据星表计算的结果能与天象吻合。……我也浏览亚里士多德的《形而上学》，或者确切地说，我也研究天体物理学和行星运动的自然原因。这种考虑的最终结果非常清楚地表明，只有哥白尼关于世界的观点(有一些小的变化)是真的，而别的两个是假的，如此而已。当然，所有这些情况相互关联、相互交织、相互纠结在一起，以至于对天文学计算的改革，在尝试了许多不同的方法之后——有些方法古人已经做得不错了，而另一些方法则是根据他们的例子模仿他们的计算——发现除了本书中所说的根据运动自身的物理因外，再也没有别的好方法。”[[78]](#footnote-78)“寻求物理原因与寻求几何结构同时进行——对开普勒来说，这两者只是同一个实在的不同侧面罢了。”[[79]](#footnote-79)结果是，开普勒已经把哥白尼运动的日心说改造成为动力的日心说，如此，太阳成了整个宇宙运动的动力来源，并以某种数学规律支配着行星的运动，看似静止的处于宇宙中心的太阳事实上成为其他星球围绕其运动的中心。

这是数学天文学的革命，由数学天文学走向物理的数学天文学，也是天文学史上的一次重大创新。

3. 开普勒第三定律——和谐定律的创立

开普勒在1619年出版的《世界的和谐》(Harmonice Mundi)第五卷第八条谈到了和谐定律的第一次发现。他说：“由于22年前某些不甚明了的原因，我不得不把《宇宙的奥秘》中的一部分搁置一旁。如今我要在此重新插入完成。借助第谷的观察资料以及我本人长期的艰苦摸索，我弄清楚了天球之间的真实距离，最后，终于发现了轨道周期与天球半径之间恰当的比例关系……任何两个行星的周期之比恰好等于它们的平均距离即天球距离之比的3/2次方。”[[80]](#footnote-80)

开普勒是怎样知道这个比例关系的呢？为什么他会注意这样一个比例？对此，开普勒虽然在《世界的和谐》中没有给出明确的回答，但是可以肯定的是，这一定律的提出仍然与他对原型的信仰密切相关。根据H. 弗洛里斯·科恩的研究，“对开普勒而言，其数学定律所适用的实在不仅仅是一种力的作用意义上的物理的东西。它在本性上首先是和谐的”[[81]](#footnote-81)；开普勒第一定律——行星在相应的椭圆轨道上绕着太阳运动——是次要的，真正重要的是“世界的和谐”。他的体现上帝和谐创造的著作《世界的和谐》，才是其著作的王冠。[[82]](#footnote-82)

总之，行星运动三定律的发现，是开普勒在坚信宇宙和谐简单的基础上不断探索的结果。“第三定律”是开普勒“毕生事业中最令他着迷的定律”，是他作为数学上的新柏拉图主义者或新毕达哥拉斯主义者坚信整个自然都是简单的数学规律性的例证。他明白，只从理论入手难有进展，需要求助于第谷的观察资料，然后再从观察事实中获得能够涵盖大部分数据甚至全部数据的理论，该理论以数学形式表示，而且具有简约与和谐的特性，经受观察数据的严密检验。如此，“开氏拒绝仅视哥氏与自己的发现为数学假说。他坚持他们给予现象世界真实的图像，因物理实有的基本结构即为数学。与前辈天文学家相异，开氏找到了一个完整统一、与现实相符的模型。‘在开氏眼中，物质宇宙并非仅是发现数学性和谐的世界，亦是被数学法则解释其现象的世界。’”[[83]](#footnote-83)。这些模型或定律及其所反映的行星运动的简单性，在天文学史上超出了前人的想象。“新的太阳系模型既有数学上之简明，又有美学上之优异。最重要的是，它呈现物理世界现实的准确图像。”[[84]](#footnote-84)

应该知道，受历史条件的限制，开普勒不可能完全明确天体运动的动力。这种状况在《宇宙的奥秘》这本书中有所体现，在该书中，开普勒提出“太阳天国辐射出来的动力”这一概念，他称为“活的灵魂”(anima motrix或motive soul)。这是一个充满泛灵论(生机论)气息的词，表示太阳驱动力既有物理上的自然特点——物质性，又具有某种原型的神性——精神性。在1609年出版的《新天文学》中宣布的行星运动第一定律和第二定律，都是建立在与生机论有关的物理学假设的基础上的。该书的副标题强调了书中一再重复的主题：“基于新天文学或天体物理学的起因，根据贵族第谷的观测，通过对火星运动的评注而给出。”[[85]](#footnote-85)在1621年，当他准备《宇宙的奥秘》第二版时，加了一个脚注：“如果你用‘力’(vis)这个词取代‘灵魂’(anima)，你便拥有了《火星评注》(即《新天文学》)中的物理学所基于的原则。因为我以前深受尤里乌斯·凯萨·斯卡利格(Julius Caesar Scaliger，1484—1558)关于致动灵智(motive intelligences)学说的影响，坚信推动行星运动的原因是一个灵魂。但是当我认识到随着与太阳的距离的增加，这种动因会像太阳光的衰弱一样逐渐变弱时，我推断这种力可能是物理的。”[[86]](#footnote-86)

由此可见，对于天球运动的原因，开普勒刚开始认为是灵魂，后来就部分否定泛灵论自然观，转向“力”，逐渐产生了宇宙是一部机器的思想萌芽。“他提出，在物理学的处理中，灵魂(anima)这个词应当用力(vis)这个词来代替，换句话说，自身是量的并且产生量的变化的机械能的概念，应该取代产生质变的活力能的概念。”[[87]](#footnote-87)“1605年，德国天文学家开普勒宣称他改宗不再信仰行星运动的‘动力因’(the motor cause)‘是一个灵魂’：‘我正忙于物理因的研究。在这项研究中，我的目的是展示宇宙机器并不类似于一个神性的生命存在，而是类似于一座时钟。’”[[88]](#footnote-88)开普勒的思想发展预示着17世纪科学的进程——从活的灵魂转变到力，从泛灵论转变到机械论。他说：“我沉迷于物理因的探索。我如此这般的目的是要表明天体机器不能被看作神性的有机体，而应该被看作时钟机器……因为，几乎所有各部分的运动都是靠单一的、简单的磁力方式实现的，这一点就如同时钟一样，所有的运动都只需要通过简单的重力来驱动。而且，我还要展现，这种物理的观念要通过计算和几何来表述。”[[89]](#footnote-89)

这种自然观的转变意义是重大的，它使得开普勒把吉尔伯特对磁性的解释当作一种模式，来解释那种可能在绕太阳轨道上驱动行星运动的力，并进而将对世界真实数学结构的揭示与对真实物理原因的探求紧密关联在了一起。结果导致：“在他那里我们可以看到，一种以地界力学原理为基础的天界力学开始取代对天界的纯粹运动学处理。现在，天文学试图理解控制行星运动的力，而不再是对圆的操纵，圆曾被认为表达了天界这个独立领域的完美和不朽。”[[90]](#footnote-90)“与哥白尼不同，开普勒将新颖的动力学论据加进了其运动学研究中。在此，与哥白尼的不同还在于，太阳不再被看作是处于运动学的非正圆心点的没有物理学功能的东西，而是被看作行星运动的动力因。新的任务也就是要从数学上来确定这些力。开普勒用磁场进行的动力学解释，只是一次(不成功的)最初尝试。在后来的牛顿引力理论中才取得了成功。”[[91]](#footnote-91)牛顿的万有引力定律就是在开普勒的第三定律的基础上建立起来的。

由开普勒的科学历程可以看出，如果开普勒墨守新柏拉图主义的自然观，就不可能基于彗星的观察资料，进一步分析提出“开普勒第一定律”；如果开普勒坚信“万物有灵论”，就不能提出星球运动的“力”的动力概念，从而也不可能用“力”来分析天体运动，将天体运动作为动力问题来处理，进而提出“开普勒第二定律”和“开普勒第三定律”。有了这些定律，人们最终可以抛开并非作为上帝第一因的宇宙的灵魂和天性，以及抛弃所有过去编造的用来解释行星轨道的运行和规模的东西，如天球、本轮、偏心圆、偏心匀速点和灵魂，并最终用机械论的概念取代天球宇宙的概念。这些似乎是开普勒的最终目的，他在与朋友通信中就说：“我的目的是要证明，天空机器(heavenly machine)不是一种神圣的、活生生的东西，而是钟表。几乎所有钟表不同形式的运动都因为一个最简单的……重量……我还展示了如何给出这些物理原因的数值和几何表达。”[[92]](#footnote-92)

总之，如果开普勒没有在自然观上的变革以及尊重事实的严肃态度，他就不可能把对世界真实数学结构的揭示与对真实物理原因的探求紧密关联在一起，不可能将观察到的事实用于数学天文学的建构中。如此，他的思维就不仅是数学的，而且还是经验的；他的天文学就不仅是数学的天文学，而且还是物理的天文学，或者是“物理的数学天文学”。对他而言，重要的不是承认数学天文学的真理性，而是敢于将这种数学真理“认定”为一种现实世界的真理，并设法找到与数学天文学理论相符合的经验证据，从而建立了一种全新的物理的数学天文学。

这在科学发展的历史上是首次。它表明开普勒的研究已经开始进入到真正的近代科学领地。他第一次提出了天体动力学的问题，试图建立天体动力学，从物理基础上解释太阳结构的动力学原因。此后，科学就一直将天体运动作为力学问题来处理。他是第一个以数学公式表达物理定律并获得成功的人，彻底摆脱了托勒密繁杂的本轮-均轮宇宙体系，完善和简化了哥白尼日心说，使之更精确、更严密、更具有科学性，从而巩固了日心说在科学上的地位。他把数学论证与物理学的“因果推理”结合在一起，这对经典力学体系的建立起到了重要的启发作用。

三、伽利略：实现了数学的物理学思想[[93]](#footnote-93)

与开普勒相比，伽利略(1564—1642)的思想和工作就更有意义了。在科学史上，伽利略可以被看作是在科学实践中建立科学方法、打开科学大门的第一人。他不墨守成规，不盲目迷信，而是向自然学习，把实验方法与数学方法结合起来，运用实验(包括理想实验和测量)，对自然进行直接的经验研究，用数学表达式描述事物的运动状态。法国著名科学史学家A. 柯依列[[94]](#footnote-94)在《伽利略研究》一书中是这样评价伽利略的：“历史学传统将伽利略视为‘经典科学之父’，不管怎么说，这种观点不无道理。因为，正是在伽利略的著作中(而不是在笛卡尔的著作中)，人类思想史第一次发展出了数学物理学的观念，或者更确切地说，是将物理学数学化的观念。”[[95]](#footnote-95)

这种对伽利略的评价是恰当的。问题是，伽利略是如何实现物理学数学化的思想的呢？这与他对亚里士多德思想的反思批判，对柏拉图主义的超越，是分不开的。

(一)伽利略物理学数学化面临的哲学诘难

伽利略所处时代是文艺复兴时期的后期，面对的是亚里士多德派物理学以及由此引申出来的冲力物理学。它们都是以亚里士多德自然哲学为基础的，拒绝数学方法的应用，由此导致的结果是，“亚里士多德学派的物理学模仿了生物学，所使用的解释范畴也与通常用以理解生命体的解释范畴相类似”[[96]](#footnote-96)。亚里士多德的物理学虽然也重视经验方法，是感性经验物理学，但是，它不是要建立一个描述物理世界的形式系统，而是要从概念上解释物理现象的所以然，它的全部任务就是制定主要范畴(自然的、强制的、直线的、圆周的)，从内在目的论描述其定性的和抽象的普遍特征的根源。“正是在这种意义上，在科学革命的前夕，传统物理学有一个人性化的特征。对于通常解释石头如何运动和我们如何运动来说，两者范畴的基本特征被认为是相似的。正因为如此，一个人可以自由地谈到这种“万物有灵”(animistic)的传统观点，给自然对象和活动赋予灵魂一类的属性(拉丁语anima就意味着灵魂)。”[[97]](#footnote-97)这是一种“质”的物理学，数学在其中的确没有用武之地。

在这种情形下，要想将数学运用于物理对象中，就必须回答如下问题：自然的本质是亚里士多德的内在目的或“四因”吗？如果回答是肯定的，则数学方法对物理对象的探讨，是否真的不能反映事物运动的本质，或不能对事物运动进行本质原因方面的解释？如果回答是否定的，则还有必要将数学方法运用于物理对象的研究中吗？或者物理学的数学化还有价值吗？如果要进行物理学的数学化，又要通过什么途径贯彻实施呢？这是伽利略物理学数学化所面对的第一个诘难。它表明，数学不能从本质上解释事物运动变化的原因，因此，将物理对象数学化并从数学的角度来认识它就没有必要。

除此之外，伽利略还面临第二个诘难，这个诘难与柏拉图的理念论有关。在柏拉图的世界中，天体及其运动都是完美的，人们可以用数学方法进行天文学研究，从而创立了数学天文学。托勒密的“地心说”和哥白尼的“日心说”的创立，都是这一思想的体现。而在亚里士多德的世界中，天上的世界是完美的，地上的世界是有缺陷的、不完美的。亚里士多德学派者认为理想化的、完美的数学是不能够应用于以真实的、有缺陷的可感物体为对象的物理学中的。这是当时流行的亚里士多德派学者的观点。

天上的世界与地上的世界真的不一致吗？天上的世界真的完美吗？不完美的地上世界真的不能运用数学来进行研究吗？这是伽利略物理学数学化必须面对的第二个诘难。它表明，要想将数学应用于地上的物理对象中，就必须打破天上世界和地上世界的二分，否则将数学运用到物理世界中就失去了它的本体论基础和认识论上的可能性。

伽利略要实现物理学的数学化，就必须面对上述哲学诘难——“以‘性质不可能数学化’以及‘从数学中不可能推导出运动’来反对将自然数学化的企图”[[98]](#footnote-98)，进行一系列的哲学创新，为数学应用到物理学的研究中创造哲学条件。

(二)伽利略物理学数学化的本体论基础

对于“伽利略为什么会应用数学方法于物理学的研究中”这一问题，很多人认为，根本原因在于伽利略坚持“自然的本质是数”这种观念。他们常常将伽利略在1610年说过的下面一段话作为证据：“哲学(自然)是写在那本永远在我们眼前的伟大书本里的——我指的是宇宙——但是，我们如果不先学会书里所用的语言，掌握书里的符号，就不能了解它。这书是用数学语言写出的，符号是三角形、圆形和别的几何图像。没有它们的帮助，是连一个字也不会认识的；没有它们，人就在一个黑暗的迷宫里劳而无功地游荡着。”[[99]](#footnote-99)

但是，仔细审读这段话，伽利略并没有明确自然的本质是数，只是说“自然”这本书是用数学的语言写成的。这点造成在考察关于伽利略对待数学与自然的关系时，不同的人有不同的理解。

第一种理解是本质主义的。这种理解能够追溯到毕达哥拉斯学派的信念和柏拉图主义的理想中。这是自然数学化的第一种形式，可以称为“数学本质论”，是人们比较偏爱的。照此，伽利略就深受当时柏拉图-毕达哥拉斯传统的影响，认为世界是完美化的按照数学建构的宇宙体系。伽利略的物理学的数学化就有了本质主义本体论的承诺，使得本体论与方法论相一致现象的描述与本质的探求是同步的。

第二种理解是科学实在论的。持有科学实在论的人们相信，写在“自然”这本书上的数学语言虽然不能反映事物的本质，但是确实是真实存在的，不是大自然的模型，也不是“拯救现象”的假说，而是存在于自然对象之中。这是自然数学化的第二种形式，可以称为“数学实在论”。如此，伽利略相信“自然存在数学结构的方面”，由此将数学应用到自然中也就顺其自然了。

第三种理解是工具主义的。他们没有承诺自然的本质是数或认为自然存在数学结构的方面，只是表明物理学研究需要运用数学计算，即它没有对自然的数学化作本体论的承诺，只是对自然进行了数学化的处理或建构，可以称为“数学工具论”。这方面的典型代表是彼特(Joseph C. Pitt)。[[100]](#footnote-100)按照这种理解，伽利略的物理学数学化也就成了工具主义的体现，对物理世界的认识只具有实用主义的特征，不具有本质的含义或实在论的真理性特征。

伽利略究竟持有什么样的自然的数学化观念呢？根据伽利略的科学实践，他悬置了对事物本质原因的探讨，似乎并没有承诺“自然的本质是数”。他认为，自然的真正和谐不在于与数字的完全相合，而在于数字能够代表事物可以量化的物理特性。他试图用物理定律来表示事物间的关系，这是从毕达哥拉斯主义到物理学数学化的发展。不仅如此，伽利略抛弃新柏拉图主义有关数的神秘化思想，坚持柏拉图的理想世界与现实世界的二分，并力图通过现实世界理想化来达到对现实世界的认识。这表明他不是一个纯粹的柏拉图主义者。但是，正如后面将要谈到的，他将数学方法运用于自然认识的重视，对物理对象的理想化处理，表明他吸收了柏拉图主义的许多思想成分，与其有许多关联和一致之处。

至于说伽利略是一个工具主义者，就更难以令人信服了。由他似乎并不持有“自然的本质是数”的断言，并不能得出他不持有“自然不存在数学结构”的结论；由他没有全盘接受新柏拉图主义有关世界数的神秘化思想，甚至没有“数学真理”的思想，并不能得出他没有受到这样的思想的影响。根据后文所述，他认为事物的第一性质是存在数学结构的，并且可以用数学来表达，如此，他就持有“自然存在数学结构方面的东西”的观点，他的物理学的数学化就不是工具主义的，而是科学实在论的或数学实在论的。

简言之，伽利略以“自然的数学化”，为物理学数学化奠定基础。进一步地，伽利略还以“自然的统一性”，为物理学数学化创造条件。

从古希腊到文艺复兴时期，传统思想认为天体的物理本质和定律在特征上不同于地球上的物体，但是，伽利略通过望远镜对太阳黑子的观察以及其他的观察和理论，对亚里士多德学派关于天界和地界有着根本区别的观点，提出了意义深远的质疑，给出了“自然统一性”的思想。华莱士(Alfred Russel Wallace，1823—1913)对伽利略关于“自然统一性”的推理链条概括如下。

主题：可观察的宇宙有一种自然的统一性。

论证：之所以如此，是因为：①在所有物体中，自然运动是相同的，而且物体在天上和在地球上自然地运动着；②亚里士多德把运动分为圆周和直线、向上和向下，是站不住脚的；③在天上存在不可观察的变化的主张不再成立，因为天上的变化已经是可以辨别的了；④细致的考察表明月亮和地球实质上没有差别。

结论：宇宙看起来是一个整体。[[101]](#footnote-101)

华莱士进一步指出：“《关于两门新科学的对话》(简称《对话》)的主要驱动力是指向世界的统一性的，表明在天上的和在地球上的物体都自然地运动着，不存在天上的物体做曲线运动，而地上的物体做直线运动的截然二分，天体和地球一样是可变的，在天上的存在和地上的存在之间不存在本质的不同，月上世界和月下世界享有一种共同的本性。”[[102]](#footnote-102)

在此基础上，伽利略宣称，不存在两种分别适用于相应领域的自然知识，只存在一种普适的知识，对地球上的普通物体的属性和运动的研究能够提供对自然的普遍理解；既然可用数学来对天上的世界进行认识，那么，也就可用数学来对地上的物体进行认识；天上的世界和地下的自然动力学都由同样的数学规律统治着，数学方法可以运用到对地上物体运动的研究中。

问题到此并没有完全解决。虽然天上的世界与地上的世界是一致的，但是，这种一致是就完美的意义而言还是就不完美的意义而言呢？当他应用望远镜发现月球表面有凹凸起伏，金星表现出像月球一样的位相，太阳表面有黑子，木星周围有4颗环绕着的卫星等后，他就抛弃了先前的“天球是完满的”这一教条，去遵循“天上的世界与地上的世界同样是不完美的”的观念。既然如此，对于这不完美的世界，尤其是地上的世界，数学何以能够运用于其中呢？这是伽利略物理学数学化过程中所必须解决的问题。

(三)伽利略物理学数学化的方法论策略

1. 悬置事物的本质，将对物体的研究转移到外在物理特征上

根据前面的分析，亚里士多德的物理学是一种自然哲学和“质”的物理学。这种“质”就在于更多地运用哲学思辨和推理，对物理对象进行认识。其中，直观经验证据是重要的，但更重要的是对经验证据的内在本质原因的自然哲学解释。经验证据与形而上学融为一体，甚至形而上学凌驾于经验证据之上，说明着经验证据。这是直到伽利略时代物理学的状态：物理学没有从哲学中分离并独立出来，物理学体现为哲学。

伽利略对这种状态大为不满，“希望将科学从哲学——已成为阻碍科学应用和进步的历史障碍——的奴役下解放出来”[[103]](#footnote-103)。他尖刻地嘲讽和批判了亚里士多德学派的物理学家，认为他们不是在阅读“自然”这本书，只是紧盯着亚里士多德的只言片语，用他们背诵的几条理解得很差的原则来谈哲学。在伽利略看来，这种以哲学的方式研究物理学的做法是存在很大欠缺的。

第一，这种物理学利用亚里士多德的自然哲学对事物的变化做出终极解释，是一种繁复的同义反复，不会产生对世界的新认识，只能为一批思维敏捷、善于感受时代精神的青年学者所厌恶。他认为，无须追问哲学意义上的终极原因，因为这些终极原因只是神学想象、哲学思辨、逻辑演绎的产物。

第二，亚里士多德的自然哲学讨论的是一个纸上的世界，缺少对具体经验的关注，而物理学必须是关于经验世界的。伽利略就说：“我这样说，并不意味着一个人不应当倾听亚里士多德的话；老实说，我赞成看亚里士多德的著作，并精心进行研究；我只是责备那些使自己完全沦为亚氏奴隶的人，变得不管他讲的什么都盲目地赞成，并把他的话一律当作丝毫不能违抗的神旨一样，而不深究其他任何依据。”[[104]](#footnote-104)

在这里，“伽利略从两个层面反对他那个时代的自然哲学家：一是他们钻进亚里士多德的故纸土堆里，而不去读自然的伟大之书；二是即使不是如前，他们由于对数学的无知，也不具备理解自然的能力”[[105]](#footnote-105)。伽利略不是反对普遍意义上的哲学家的活动，而只是反对哲学家侵犯到自然哲学中来。伽利略就说：“我们的争论是关于可感世界，而不是纸上谈兵”。[[106]](#footnote-106)经验是“天文学真正的女主人”[[107]](#footnote-107)，“天文学家的主要任务仅仅是为天体现象提供理由”[[108]](#footnote-108)。伯特就说：“毕竟，展现在我们面前的感觉事实是有待解释的东西，不能置之不理或将其忽视。伽利略每每觉得有必要诉诸感官的证实，并不只是为了赢得争论。他的经验主义是相当深的。”[[109]](#footnote-109)

不仅如此，伽利略认为，物理学最重要的以及首要的，是运用数学进行测量，获得经验证据。伽利略借萨尔维阿蒂(Salviati)[[110]](#footnote-110)之口说道：“辛普利邱(Simplicio)，请你注意，如果没有几何学，而要对自然界进行很好的哲学探索，人们究竟能走多远呢？”[[111]](#footnote-111)他说这句话的意思不是说科学不要哲学，或者与哲学一点关系也没有，而是说物理学应该运用数学，追求确定性的认识，不能置经验事实和数学于不顾，只是运用哲学的教条、想象和推理，寻求书本上的知识。

在上述认识的基础上，伽利略认识到：“现在似乎不是探索自然运动加速度之原因的合适时机，不同的哲学家已对此表达了不同的观点，有些哲学家用中心吸引力来解释；另一些哲学家则用物体非常细小部分之间的排斥力来解释；还有一些哲学家则将其归于周围介质中的某种压力，这种压力在落体的后部闭合，驱使其从其中的一个位置移向另一个位置。而所有这些想象以及其他想象都应该接受考察，但此事并不真的值得去做。目前，我们作者的目的只是探索和证明加速运动的某些性质(不管这种加速度的原因可能是什么)……”[[112]](#footnote-112)

照此，伽利略的物理学研究就是，努力打破亚里士多德学说以及经院哲学和圣经的教条，悬置目的论和亚里士多德的四重思想(包括激发、生命有机体的模式、生存冲动以及伴随着它们生存冲动而展开的生物的目标和目的)，放弃对事物为什么运动的终极因和目的因的探求，将研究转移到物质的外在物理特征和事物怎样运动上面。所有基于价值、完满性、和谐、意义和目的的哲学思想都被伽利略从科学思想中除去，所有从终极因、目的因中去寻求解释的哲学思维方式被抛弃，取而代之以物质经验证据和数学测量对物理对象进行解释。这一定程度上实现了物理学同哲学的分离，最起码是同亚里士多德自然哲学“自然内在目的论”的分离，将科学从哲学的奴役地位中解放出来。

这种解放意义重大，扭转了人们对物理对象的研究视域，为人们运用实验方法和数学方法认识事物的外在特征，创造了前提条件。这表明，伽利略的物理学既不是亚里士多德的，也不是哲学式的，而是经验的和数学的，即是近代自然科学的。

2. 把科学研究的对象限定在满足数学必然性的第一性质上

为了能够对事物进行量的分析，建立数学的物理学，伽利略将物体的外在特征或性质分为两类：第一性质，包括形状、大小、位置、时间、空间、运动等；第二性质，包括气味、颜色、声音、味道等。他认为，第一性质是物体固有的，存在于物体之中，其值可在数学上定量；第二性质并非物体固有的，是当我们遇到一个特定物体时第一性质在心灵中造成的主观感觉，与感觉有关且只存在于感觉之中，不可定量分析。基于绝对不变的第一性的数量知识是可靠的，而基于第二性的“主体的感觉为中介”的知识是模糊而不确定的。“我不相信，为了刺激我们的味道、气味和声音，除了大小、形状、数字和缓慢或快速的动作外，我们的外部身体还需要任何东西；我认为，如果耳朵、舌头和鼻子被拿走，形状、数字和动作将保留下来，而不是味道、气味和声音。我相信，除了活生生的事物之外，这些除了作为名字之外，什么都不是——就像当腋窝和鼻子周围的皮肤都不存在的时候，痒和瘙痒(tickling and titillation)只不过是名字。”[[113]](#footnote-113)

随着伽利略对物体第一性质和第二性质的区分，自然被还原成为“一个呆滞的存在：没有声音，没有感觉，没有颜色，仅仅是一个匆匆离去的、无穷尽的、毫无意义的物质”[[114]](#footnote-114)，失去直接的趋向、目的、价值、意义和变化。由此他也开启了“形式-机械论”的自然观。[[115]](#footnote-115)他把运动物体中的那些可度量、可由数学规律联结的特征分离了出来，并将科学研究的对象限定在满足数学必然性的、可观测的物体的第一性质的范围之内；形而上学的理念、形式因、本性等，连同第二性质，都被当作物体运动的非实证的、不可定量的、不真实的性质，从物理学中除去了。亚里士多德用到的诸如活动性、刚性、要素、自然位置、猛烈的运动、潜势等这样一些关于质的概念，被伽利略选择的距离、时间、速度、加速度、力、质量、重量等这样一些可以测量的概念所代替。[[116]](#footnote-116)“我们现在不是用实体、偶性与因果性、本质与理念、质料与形式、潜能与现实来处理，而是用力、运动、定律、时间和空间中的质量变化等等来处理。”[[117]](#footnote-117)

通过测量，度量那些可以度量的，分析、反思与之相关的运动现象，集中研究空间、时间、重量、速度、加速度、惯性、力和动量等，不对事物的本质、内在的趋向和目的进行哲学性的定性研究，而是对它们的重量、硬度和尺寸等进行定量分析，如此，最终就抛弃亚里士多德的“质”的物理学，发展出“量”的物理学。“物理空间被认为等同于几何学领域，物理运动正在获得一种纯数学概念的特征。因此在伽利略的形而上学中，空间(或距离)和时间变成了基本范畴。真实世界是由正在作可作数学处理的运动的物体构成的，这意味着真实的世界是在空间和时间中运动的物体的世界。经院哲学把变化和运动分解为目的论范畴，作为对目的论范畴的替代，我们现在赋予这两个此前无足轻重的东西以作为绝对数学连续统的新的意义，并把它们提升为基本的形而上学概念。再次重申，真实的世界是处于空间和时间之中、可对运动进行数学测量的世界。”[[118]](#footnote-118)

这应该是伽利略物理学数学化的自然观基础，也是他在物理学上运用数学方法，主要研究物体的运动状态变化——静力学或运动学的原因。

3. 理想化实验方法的提出

上面两点分别表示了要实现物理学的数学化，一是要研究事物的外在特征，二是要研究外在特征中的第一性质。这里有一个问题仍然没有解决，就是现实中物理对象的第一性质的表现是不理想的，不理想的第一性质如何能够与理想的数学相符呢？这点正像那时亚里士多德学派的质疑，“这些数学上的微妙论点抽象地说来是很不错的，但是应用到感觉的和物理的事件上就不成了”[[119]](#footnote-119)。

针对上述观点，伽利略加以回应。他认为，“正如计数的人在计算糖、丝绸和羊毛时必须除掉箱子、桶和其他包装一样，数学家要在具体条件下看出他在抽象条件下所证明那些原理时，同样必须除掉那些物质的障碍，而且如果他能做到这样的话，我敢向你保证，事物是和计算的结果同样符合的。所以错误不系于抽象还是具体，也不系于几何学或者物理学，而系于计算者是否懂得进行正确的计算”[[120]](#footnote-120)。

他是怎样“计算”的呢？是运用理想化的方法——现实测量实验的理想化与思想实验方法的有机结合实现的。伽利略认为：“我们必须将现实世界理想化，因为不可能期望将我们这个丰富而又奥秘的世界完全以数学表示出来——即使我们忘掉色彩和气味，而将注意力集中于诸如形状和速度这些方面。也就是说，我们必须忘掉那些对于实现我们的目的来说属于非本质的东西。但这样做必须十分谨慎才是，否则，我们就会处于一个与我们生活于其中的真实世界毫无关联的纯想象的世界中了。”[[121]](#footnote-121)经过上述处理后，就可以对物理对象进行量的认识了。我国学者就指出：“一旦抽象出了关于物体第一性的质的可观测量的概念，便可把观察实验限制在关于物体运动之可观测的、可定量的物性范围之内。一旦对个体对象与经验对象进行了抽象的、理想化的、分析的、设定性的理论实体的处理与类的处理，便可建立起能蕴涵大量经验内容的、具有普遍必然性的公设与演绎系统。这样，伽利略便把观察实验与数学演绎方法有机地结合起来了，从而便成功地创造了近现代实验自然科学研究的真正方法——数学实验方法。”[[122]](#footnote-122)

伽利略就是这样创立了理想实验方法——通过一定的物质操作和思维加工相结合的实验过程，得到自然过程在理想状态下的规律，然后再回到现实的过程中去加以修正，使之能直接应用于实际。“对伽利略来说，真实的世界是那个抽象数学关系的理想世界，而物质世界则对这个作为蓝本的理想世界的不完美实现。要想恰当地理解物质世界，就必须在理想世界这个有利角度在想象中去看待它。只有在理想的世界中，完美的圆球才能在完全光滑的平面上永远滚动下去。而在物质世界里，平面从来也不是完全光滑的，球体也从来不是完美的球形，滚动的球体最终会停下来。”[[123]](#footnote-123)这样一种工作程序是现代一切科学工作所使用的常规方法。这是自伽利略开始的，从某种意义上说只有这种方法才是真正的科学实验。伽利略的实验方法有两点尤其重要：“第一，当得到意想不到的实验结果时，他并不拒绝——他质疑自己的思路；第二，他的实验是量化的，这在当时是一个革命性的观念。”[[124]](#footnote-124)

经过前面的分析，可以得出下面结论：“他(伽利略)先于牛顿形式表达法(formal method of presentation)将他的分析方法分为‘定义、公理、定理和命题’，并从最简单、匀速的运动开始，然后转到加速和非自然或抛物运动中；其次，他用图示来说明推理，产生四个公理和六个定理。他的方法论预见了现代科学中对先验假定甚至常识性定义的拒绝，而倾向于那些由实验证据支持的最好的‘契合自然的现象’(fitting natural phenomena)。”[[125]](#footnote-125)

伽利略之所以能实现物理学的数学化，是有其哲学思想基础的。而其哲学思想基础的建立，又是基于对传统科学所奠基的哲学思想基础的反思、批判、决裂或者扬弃。如对于亚里士多德派的物理学家，伽利略总体上是反思批评的。他否定了亚氏从本质的角度研究物理对象的动机，强调了数学在研究物理对象上的可能性、必要性和现实性，抛弃了亚氏对日常经验的肯定，对其加以批判性的考察和解释，从而走向批判的经验主义。对于柏拉图主义，伽利略总体上坚持“扬弃”。他坚持了其重视数学于世界研究的传统，受着理念论的影响，走向理想实验。不过，他抛弃了柏拉图主义的神秘主义成分，否定了物理学的研究只是数学的先验论证的观念，批判性地考察了经验世界的真实性以及其对理性发现的数学形式的说明，由此实现了经验世界与认识的数学形式之间的和谐一致性，从而最终也使物理学的数学化得以实现。伽利略的物理学数学化是与他对亚里士多德思想的反思批判，对柏拉图主义的坚持突破分不开的。这是其物理学数学化的思想基础。“因此，为什么在伽利略解决之后，所有的科学问题都不像以前那样了呢？在很大程度上取决于他对科学可理解性的重新定义以及他实现科学的可理解性的方法：只有一种新的解释性典范和一种史无前例的将理性与观察结合起来的技巧，才能以如此激进的方式改变自然哲学。难怪当我们读到他的作品时，我们首先会被他在具有2000年历史的科学理性画卷上以非凡的方式画出近代科学的特点所震撼。”[[126]](#footnote-126)

当然，伽利略所处的时代是近代科学革命的前夜。伽利略对传统物理学及其哲学思想基础所进行的反思、批判、扬弃，不是一蹴而就的，而是逐渐的、不完全的、不彻底的，甚至是随具体情况变化而变化的。伽利略并不是专门的哲学家，并没有专门、系统、清晰地阐述他的物理学数学化哲学思想，他的这方面思想主要体现在对新科学的哲学辩护，尤其是方法论的辩护上。对哲学的关注，对方法的追求，对反对派哲学家的回击，对哲学家头衔的维护以及对科学的哲学问题争论的兴趣和贯彻等，构成了他的科学实践活动和融会于其中的哲学思想，同时也展现了伽利略的科学不单纯是一些结论的集合和方法的阐述，也不是纯粹的科学成果，而是与科学活动紧密关联的哲学思想的探讨。他对哲学的反思、批判、扬弃，主要体现于科学实践之中，以及对科学实践的哲学理论化的反思之中。

四、哥白尼的“日心说”是如何被接受的

上一节主要阐述伽利略是如何创立数学的物理学的。事实上，伽利略对于天文学(哥白尼的“日心学”)也有他的贡献。伽利略虽然不是第一个用望远镜望天的人，在他之前有英国的哈里奥特(Thomas Harriot，1560—1621)，但是，哈里奥特没有公布他的发现，而伽利略则将他的发现在《星际使者》(The Messenger of the Stars，1610年)、《关于太阳黑子的书信》(Letters on Sunspots，1613年)、《关于两大世界体系的对话》(Dialogues Concerning the Two Chief World Systems，1632年)中公布了出来。这些发现一定程度上支持了哥白尼日心说的正确性和托勒密地心说的错误性，也相应地反驳了与地心说相一致的亚里士多德的自然哲学体系。鉴此，是否当时的人们就应该接受哥白尼的“日心说”呢？哥白尼的日心说在提出之后是如何被当时的人们对待以及接受的呢？对此，学界有不同的视角和看法。

(一)德威特科学哲学视角：从工具论到实在论接受日心说

德威特(R. Dewitt)从科学哲学——实在论与工具论的视角，对上述“日心说”的提出及其发展历程进行了探讨。

1. 16世纪：基于实在论接受地心说以及基于工具论应用日心说

德威特认为，对于一个理论来说，它或者被人们看作是工具论的——仅仅是解释和预测相关证据的工具；或者被看作是实在论的——不仅能够解释和预测相关的证据，而且还能够反映事物的本来面目；或者被看作是混合的——理论的一部分被看作是工具论的，另一部分被看作是实在论的。[[127]](#footnote-127)当遇到相互冲突的理论时，还有可能同时接受两个互相冲突的理论，对一个理论持工具主义者态度，而对另一个理论持实在论者的态度。[[128]](#footnote-128)

德威特比较了托勒密的地心说和哥白尼的日心说，认为在天体遵循匀速圆周运动等自然哲学观念方面，哥白尼天文学体系稍微要好了些，因为它舍弃了“均衡点”这一概念；在复杂性方面，两者都是复杂的，很难区别它们；在对星球逆行运动的解释方面，哥白尼天文学体系有着更加自然的解释；在实在论方面，从当时的情况看，是强烈支持托勒密天文学体系的，即认为地球是宇宙的中心。结果是：“在大多数方面(除了不使用等距点和对逆行运动的解释两方面)，哥白尼体系并没有比托勒密体系更好，在某些重要方面(比如，在‘地球是静止的’和‘地球是运动的’两个观点中，哪一个观点更为合理)，哥白尼体系远不如托勒密体系。”[[129]](#footnote-129)

既然如此，在日心说被哥白尼提出后的16世纪后半期，托勒密的地心说仍然广为人们所接受，而哥白尼的日心说仅为少数人相信其是正确的并被接受。不过，这也并不表明哥白尼的日心说被当时的社会断然拒绝。德威特的研究表明，哥白尼的天文学理论被广泛地阅读、讨论，也广泛地在欧洲的大学里被用于教学。不仅如此，它还被用作制作天文学图表。这是什么原因呢？德威特认为，部分原因是自托勒密天文学体系出现之后的14年间，一直没有出现另外一个完整的天文学体系，而一旦哥白尼的天文学体系出现后，给人们留下了深刻印象，人们将他称为“托勒密之二”；另外一个原因就是，哥白尼的日心说在制作天文图表上面与托勒密的地心说具有几乎同等的预测和解释的优势，而且16世纪急需一套新的天文学图表(旧的一套是13世纪制作的，已经过时)，哥白尼的日心说正好满足这一需求。[[130]](#footnote-130)

这就是说，人们阅读、讨论乃至教学哥白尼的日心说，并不是抱着它是一个正确的理论的态度——实在论的态度，而只是抱着一个工具主义的态度，即认为它是一个有用的天文学体系，它能够解释和预测一些现象，但它的最基本的假设“太阳为中心”是错误的。这样的状况也使得它提出后，能够与托勒密的天文学体系和平共存，虽然某些宗教领袖出于宗教的原因而非实证的原因强烈反对它。对此，德威特总结道：“除了少数一些例外情况(当时存在某些新柏拉图主义者和少数其他人用现实主义态度看待哥白尼体系)，哥白尼体系都被当作一个实用工具，并没有人认为它是对宇宙真实情形的反映。”[[131]](#footnote-131)

尽管人们当时可以以工具主义的态度来对待哥白尼的日心说，但是，对其所展示的优势以及揭示的地心说的问题如“均衡点”等也不可等闲视之。第谷依据他自己的天文学肉眼观察，试图在“地球是宇宙的中心”前提下，综合这两个理论。

2. 1**6**世纪末**17**世纪前半叶：地心说和日心说折中的“第谷理论”及其接受

第谷先是对炼金术感兴趣，后来因为1577年彗星的出现转向研究天文学以及占星术。他认为彗星不在大气层中而在天上。他进一步计算了彗星轨道，发现彗星经过或者穿过了某些行星的轨道。这是惊人的，根据亚里士多德的理论，每个行星都处在一个由第五元素构成的坚硬且透明的完美的水晶球上，水晶球携带它的行星一起旋转，其他星球是不可能穿越它们的。

为了解释这种反常现象，第谷对亚里士多德的上述理论进行了调整。他认为，第五元素并非如亚里士多德所认为的那样是坚硬的，而是液态的流体，在地球上不存在，其特别之处在于，它携带着行星旋转，而且还允许天球如彗星穿越。在此基础上，他进一步吸收哥白尼的可取之处，对托勒密的地心说作了局部调整，形成了他自己的理论——“第谷理论”。

在“第谷理论”中，又有了恒星天球，而且地球处于宇宙的中心；太阳和月亮围绕地球旋转，前者365天绕地球一圈，后者大概28天绕地球一圈；水星、金星、火星、木星和土星围绕太阳旋转，就像太阳围绕地球旋转一样。行星的轨道好像大的本轮，这些本轮以在绕地轨道上运转的太阳为轴心，太阳的轨道构成了全部行星的均轮，见图7.3。

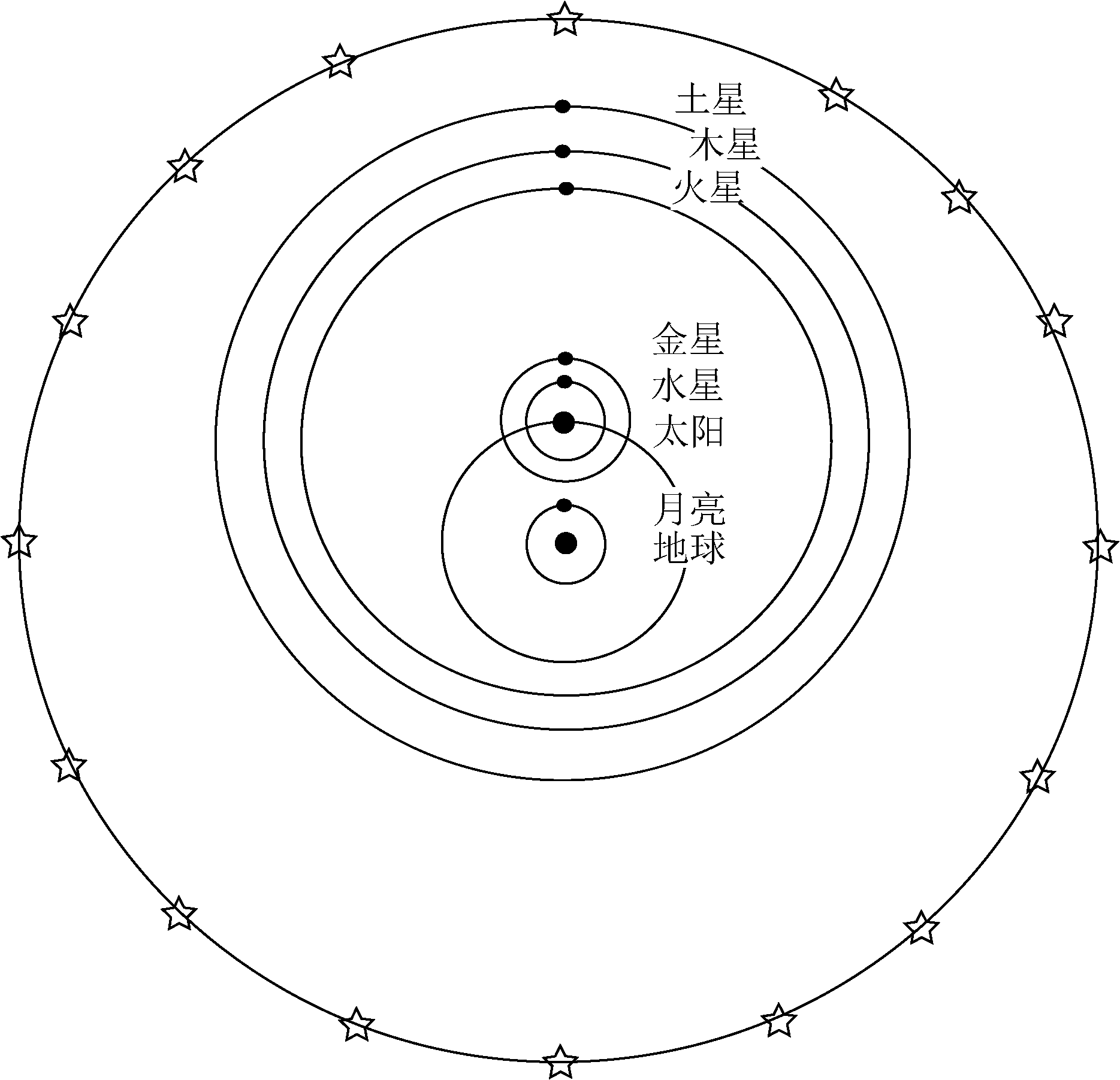


图7.3　第谷天文学体系图[[132]](#footnote-132)

考察第谷的“天文学体系”可以发现，“第谷体系得到认可的一个优势是它保留了哥白尼体系的优势，同时也保留了‘地球是宇宙中心’的观点”[[133]](#footnote-133)。它在解释地心说不能解释的某些星球运动现象如“逆行”时，能够与哥白尼日心说的解释一样好，但同时它还能够解释那些哥白尼日心说不能解释而托勒密地心说能够解释的那些现象，如“物体垂直下落”“浮云飞鸟”等现象。

分析“第谷理论”的创立，实际上体现了拉卡托斯(1922—1974)的《科学研究纲领方法论》思想。[[134]](#footnote-134)第谷在创立他的“地心说”的过程中，坚持“反面助发现法”，将否证的矛头指向“保护带”，保留了“地心说”的核心内涵——“硬核”——地球是宇宙的中心并且是静止的，同时在“正面助发现法”的指导下，改变了地心说的“保护带”，发展了“第五元素”的内涵，创造性地吸收了哥白尼的某些观念如行星(除地球以外)围绕太阳运动，使其能够很好地解释以往地心说难以解释的现象，发展和形成他自己的天文学体系。就此而言，“第谷理论”有一定的合理性。

不过，这种合理性仍然不能掩盖第谷天文学理论体系的不足，关键之点在于它是“地心说”与“日心说”的折中。这并不太令那些坚信“地心说”是完全正确的宗教徒信服。但是，随着伽利略利用望远镜发现了更多的支持行星围绕太阳运转的观察证据，“第谷理论”就成为那些坚信“地心说”的人士的另外一种选择。

这种选择不无道理。因为，无论是17世纪伽利略的那些天文观察，还是19世纪的恒星视差(stellar parallax)观察，或者是现代的太空天文观察，都不能为地球围绕太阳旋转提供直接有效的证明。基于这一点，现在仍有某些虔诚的信徒在“地球是宇宙的中心”的基础上，进一步修正第谷天文体系。[[135]](#footnote-135)

尽管如此，随着开普勒提出行星运动三定律，行星做完美的匀速圆周运动观念被行星在椭圆轨道上做非匀速运动的观念所代替，哥白尼“日心说”中的本轮、均轮、偏心轮等被放弃，开普勒的天文学体系比托勒密的“地心说”以及哥白尼的“日心说”都要简单，而且，它的预测和解释能力更强。按理说这应该受到人们更多的关注。但是，历史事实似乎并不如此。究其原因在于：

第一，一些人努力将其并入自认为完美的匀速圆周运动的天文学体系中，即承认开普勒的成功而不接受他的方法；

第二，开普勒天文学体系出版时间为1609年(至少是关于火星运动的部分)，而在第二年，伽利略公布了他利用望远镜所做出的新的天文学发现，这遮蔽了开普勒的天文学发现；

第三，自从伽利略公布他的望远镜的天文学发现后不久，天主教就开始正式反对“太阳是宇宙的中心”的观点，限制关于这个问题的讨论和出版的著作，开普勒在1609年及其之后出版的相关著作也在禁书之列。[[136]](#footnote-136)这也使得他的“天体非匀速椭圆轨道运动”的思想直到17世纪中叶才被学界普遍接受。当然，这样的接受是以实在论的态度进行的，即他的天文学体系描述了月亮和行星真实的运动方式。

3. 17世纪中叶：人们对日心说的最终接受还是基于实在论

到了伽利略这里，他于1609年开始运用望远镜进行天文观察，做出了一系列的发现，如月球山脉、太阳黑子、土星环、木星卫星、金星相位、恒星新发现。这些发现对于打破亚里士多德和柏拉图的世界观以及树立哥白尼的“日心说”，具有重要的意义。“月球山脉”喻示天上世界并非由以太构成，“太阳黑子”喻示天上的世界的不完美，“土星环”喻示天上的世界的不完美以及并非由以太构成，“木星卫星”喻示宇宙的运动中心并非只有一个，“金星相位”喻示相关证据与托勒密的“地心说”相悖，“恒星新发现”喻示恒星的无数以及宇宙的无限。所有这些看来都与亚里士多德宇宙观不符并且支持哥白尼的“日心说”。此时再说“日心说”只具有工具的意义已经不再可能。“日心说”是不是真实的这一问题，就非常突出地摆在伽利略以及那些关注“日心说”的神学家面前。

在《给大公夫人克里斯蒂娜的信》中，伽利略向她以及她所在的家族美第奇家族说明，自己的观点与《圣经》和天主教教义并不矛盾，他与她们家族的立场是完全一致的。不过，“伽利略清楚地表明，他认为《圣经》里的每一个字都是正确的。然而，他同时表示，《圣经》是写给所有人看的，包括那些生活在很久以前、科技还不发达年代的人们，以及几乎没有受过教育或者仅接受过少量教育的人们。因此，《圣经》的写法决定了其真正的含义通常很难确定。于是，伽利略认为，当我们面对可以有经验性/科学性证据来支撑的经验性/科学性命题时，我们应当认为经验证据的说服力比宗教经文所提供的证据更强，而且我们决不应该依靠《圣经》来对这样的经验命题做出最终裁决”[[137]](#footnote-137)。

根据上面这段话，伽利略的意思是：日心说是正确的，不影响救赎，且其正确性不应由宗教教义来判断。这种日心说的实在论的观点以及关于科学与宗教之间的关系叙述，必然遭到教会的反对。红衣主教圣贝拉明(Saint Robert Bellarmine，1542—1621)在《给福斯卡里尼的书信》中明确表示，他不同意伽利略的上述观点。他认为，地球是否围绕太阳运转是与救赎相关的，《圣经》教义对此有裁决权，而且，关于地球是否真的围绕太阳运转，无法演示。[[138]](#footnote-138)他警告伽利略，不得支持哥白尼的日心说。

如果说贝拉明上述话语中的前半段是错误的，那么他的后半段还是有一定道理的。他的意思是，即使伽利略利用望远镜所观察的事实是真实的，仍然不能就说地心说是错误的而日心说是正确的，地心说并没有被有效证伪。

这就是说，在当时的历史条件下，伽利略的那些天文学观察并非无可置疑，其对日心说的支持也并非完全确定，无懈可击。鉴此，当将日心说看成是正确的并因此造成对宗教教义的冲击时，必然会遭到宗教神学家们的反击。1616年2月，宗教裁判所谴责日心说“在哲学上是愚蠢和荒谬的，在形式上是异端邪说。因为无论是根据其字面上的意义，还是根据罗马教皇(Holy Fathers)和神学家们(Doctors)通常的阐述和意图，它在许多方面都明显地有悖于《圣经》教义”[[139]](#footnote-139)。几个星期后，《天球运行论》被列入禁书，伽利略也被警告，不能为哥白尼的日心说辩护。

在此之后，伽利略沉默了一段时间。在此期间，他仍从事着相关的研究，似乎裁决对他的影响不大，被禁的是哥白尼的著作以及与之紧密相关的著作。到了1623年，伽利略计划撰写一部为哥白尼日心说辩护的著作。9年后这部著作出版了，它就是《关于两大世界体系的对话》(Dialogo sopra i due massimi systemi del mondo, tolemaico e copernicano，简称《对话》，1632年)。该书之所以能够出版，在于他在该书的结尾声称他所说的“哥白尼日心说只是一个假设，并非真实存在”。

《对话》全书由四天不间断的对话组成。第一天的话题是关于世界的统一，即地球和月亮。伽利略的观点是，亚里士多德关于“天上的世界和月下的世界是不一样的”观点是基于日常观察的，月亮上的山脉是基于他的望远镜发现的，如果所发现的这样的新的天文学现象是正确的，那么月亮与地球一样，也是不完美的。第二天的话题是关于地球是否在做旋转运动的问题，伽利略用行驶中的船上物体下落的例子表明，感官经验具有欺骗性，物体的运动具有相对性，经验在判决地球动与不动这一问题上是中立的，不能依据物体下落运动的状态来反驳哥白尼的日心说。第三天的话题是关于地球和其他行星绕着太阳旋转的论据的问题，这涉及恒星视差。至于没有观察到恒星视差，伽利略解释道，这是因为恒星的遥远以及人类观察力和理解力有限。一旦使用望远镜进行观察，这可以得到新的观察结果以对此有所启发。第四天的话题是关于地球上的潮汐现象，伽利略认为地球的自转与地球潮汐运动之间是紧密相关的。[[140]](#footnote-140)

根据上述《对话》的简介可知，该书的实际内容是为哥白尼的日心说辩护的，伽利略事实上坚信日心说正确。正因为如此，《对话》出版后不久就很快遭到禁止，伽利略本人也受到宗教法庭的审判。审判一共进行了四次：第一次庭审，主要证词来自贝拉明，表明伽利略在收到教皇的通知——不能为哥白尼的日心说辩护之后，没有在任何人面前宣誓放弃自己的学说；第二次庭审，伽利略承认自己有“虚荣的野心、纯粹的无知和疏忽”，表明自己只是在1616年禁令之前是哥白尼主义者，《对话》本身事实上是要反驳哥白尼日心说的，而且他表明自己可以在《对话》中加入一两天以驳倒错误的和受谴责的观点；第三次庭审，伽利略强调贝拉明通知的模糊性，并请求基于他的健康和年龄方面的原因，给予宽恕；第四次庭审，伽利略再次重申自己只在1616年之前对哥白尼日心说犹豫不决，之后则把托勒密视为真实的和不容怀疑的。但是，所有这一切并不能改变宗教法庭审判者的看法，最终伽利略被监禁并且命令他正式宣布日心说是错误的。

事实上，对伽利略的审判并没有有效地阻止哥白尼日心说的传播和接受，相反地，还促进了一些学者的进一步思考。如果伽利略望远镜的发现确实是真实的，那么它就确实能够给予哥白尼日心说以支持。随着科学认识以及世界观的转变，越来越多的人开始接受日心说。德威特就说：“似乎很明确的一点是，到了17世纪中叶，大多数跟踪着新发现发展的人都已经相信日心说观点是正确的。”[[141]](#footnote-141)至此，那些接受哥白尼日心说的人，大多是基于实在论的态度来接受它的，这完成了从工具主义的日心说理解到实在论的日心说理解的转变。

(二)舒斯特科学知识社会学视野：通过社会亚文化接受日心说

1. 1543—1600年：日心说并非比地心说优越

舒斯特认为，接受一个理论与该理论是否正确有关。他进一步认为，在哥白尼的时代，判断哪一个理论更正确的标准与我们现在的不同，并不完全根据该理论与那些已为人知的“事实”相符合，而是根据以下标准来对某一个理论进行评判：简洁性(simplicity)、精确性(accuracy)、与公认知识的一致性(agreement with accepted knowledge)、引人注目的新预测(dramatic new predictions)。比较哥白尼日心说与托勒密的地心说在这四个方面的得分，结果如下：两种理论使用的本轮和均轮数量基本上相符，简洁性不相上下；两种理论作出的预测与可以获得的人类观察数据之间的“差距”较为接近，精确性不相上下；托勒密的地心说与人们日常经验观察以及《圣经》的观点相同，而哥白尼的日心说与这两个方面相悖，两者相差很大；对于“已被证实的重大事件预测”，不言而喻仍然是托勒密的地心说获得更大的胜算，而哥白尼日心说的新预测则遭到亚里士多德派学者的反击，并与常识相违背；至于哥白尼提出的恒星视差，应该算一个“引人注目的新预测”，只是这样的预测现象在16世纪不能为任何人观测到，虽然哥白尼对此做了解释——“恒星天球与我们的距离比我们想象的要远得多”，但是，这一解释仍然不被更多的人接受，因此在“已被证实的对重大事件的预测”或“引人注目的新预测”方面，虽然舒斯特认为对两者的评价会取决于评价者的立场，但在16世纪“日心说”是不如“地心说”被人们所接受的。[[142]](#footnote-142)

根据舒斯特的上述比较，在哥白尼提出日心说之时，各个方面并不优越于托勒密的地心说，日心说是不可能被人们普遍接受的。

对于上述观点，有人会提出疑问：哥白尼的日心说难道不会凭借其在数学方面的优美，以及随之而来的宇宙的和谐，获得人们的普遍认同和接受？表面上看是如此，但是，正如舒斯特所言：“对于一个亚里士多德学派的人来说，哥白尼的理论的优美是不重要的，因为事实就是，地球实际上不在运动。这种所谓的‘和谐’只是纸上谈兵——他们怎么能让一个物理上不可能的理论变成事实呢？的确不可能！”[[143]](#footnote-143)

以上就是哥白尼日心说在刚提出时的境遇。考虑到上面这些，在哥白尼《天球运行论》(1543年)出版后的第一代人中(1543—1570年)，专业天文学家对哥白尼的反应是非常挑剔而专业性的。他们认为哥白尼的日心说是错误的，但是其中有可取之处，可以整合到托勒密的地心说中。

对于这样的可取之处，有两个方面：第一，是有关均衡点的问题。根据柏拉图的观念，天球是做匀速圆周运动的，而在托勒密的地心说中，均衡点的设立却使星球的运动规则与柏拉图确立的匀速圆周运动的规则不一致，产生出运动的加速或减速效应。如果柏拉图的思想是正确的，那么均衡点的设立就与此相违背，进一步地由此建构出来的地心说，似乎就不是对天球真实运动的表征，需要进一步调整以与观察数据相符合。“均衡点”的设立就是科学哲学中“工具论”的体现。可以说，哥白尼意识到了这一点，对均衡点的设立很不满意，认为它在哲学上或者在美学上都是不可接受的，是错误的，应该除去。在他的日心说中，他确实这样做了。这点受到专业天文学家的称赞。第二，是有关行星与太阳的距离问题。在哥白尼的日心说中，给出了行星水星、金星、地球、火星、木星、土星等天球与太阳间的距离的相对排序，见图7.4。当时的专业天文学家认为这是非常富有智慧的，也是宇宙和谐的重要体现。

除掉上面的两点之外，当时的专业天文学家认为哥白尼的其他方面就没有什么可取之处了，毕竟在《天球运行论》的序言中，也声称该书提出的日心说仅仅是一个计算工具，是不可能正确的。这种状况导致：在1543年到约1600年之间，欧洲真正信奉哥白尼学说的人屈指可数。在《天球运行论》出版后的两代人中，哥白尼学说并不像个得胜者。[[144]](#footnote-144)

到了哥白尼之后的第二代，即从大约1570年至1601年，更多的人意识到《天球运行论》的序言并非哥白尼所写，而是由奥西安德(Andreas Osiander，1498—1552)所写(这是开普勒后来证实的)，事实上哥白尼本人认为他的“日心说”是正确的。但是，这仍然没有促使人们把“日心说”当成是正确的，更多的人以工具主义的观念看待哥白尼的“日心说”，即把它当成是解释和预测天文学现象的一个理论工具，而非真实的存在。



图7.4　哥白尼体系的“简单”版本[[145]](#footnote-145)

这种状况也决定了哥白尼日心说在提出后的16世纪余下的时间，并没有被更多的人所接受，人们接受的仍然是托勒密的地心说。由此，也就好理解，在第谷基于地心学并且吸收日心说的某些观念而提出他的天文学体系——“第谷理论”以后，这一理论被人们所接受，被理性的进步人士所信奉。

2. 1601—1630年：被更多接受的是“第谷理论”而非“开普勒三定律”

舒斯特考察了“第谷理论”，认为它在17世纪前30年比哥白尼的天文学理论被更多的人接受，究其原因，是因为“第谷理论”有以下几方面的优势。[[146]](#footnote-146)

首先，他把地球静止地置于宇宙的中心，因此，以“事实”为基础的条理分明的亚里士多德的地球物理学复原了。

其次，他的体系不悖于《圣经》的文本诠释，尽管这一点并不是每个人都会看重，但这是一条具有愈益重要的标准。在这一点上他再一次打败了哥白尼。

最后，令人惊奇的是，这个体系实际上包含了哥白尼学说的宇宙和谐。第谷论证了他的理论和哥白尼的理论在几何学上是一致的，太阳和月亮围绕地球转，其他行星围绕太阳转，这体现了神的指示。第谷理论能够解释金星和火星的逆行，而且没有恒星视差这一预测。

总之：“第谷成功地提出了一个出色的新主张——这个主张制服了所有反对哥白尼的意见，同时体现了支持哥白尼自己的体系的最重要的和最根本的论点——和谐。”[[147]](#footnote-147)正是“第谷理论”具有这种优势，成为当时的第三种天文学理论，并且在三种天文学理论当中是最好的，受到各界的广泛支持。[[148]](#footnote-148)“第谷体系在1600—1630年那个时代是最最被广泛接受的理论。”[[149]](#footnote-149)这种状况有点出乎意外。在我们当代人的印象中，开普勒在16世纪末、17世纪初提出了行星运动三定律，发展了哥白尼的日心说。按理说，这一时期被更多人接受的应该是发展了的哥白尼的日心说。不过情况并非如此。

开普勒是一个新柏拉图主义者。他认为自然界的蓝图是上帝设计的，上帝设计这一蓝图是有目的的，就是这一自然界的蓝图是简单的、优美的数学结构；人类能够揭示这一数学结构，而且一旦揭示了这一简单的、优美的数学结构，则表明人类已经发现了真理，并且由此体现上帝的伟大。这造成开普勒赞成哥白尼的日心说，并且像哥白尼那样，努力认识宇宙的和谐以体现上帝的伟大。

上帝如何伟大呢？开普勒在《宇宙和神秘》(1597年)中提出的“宇宙模型”体现了这一点：“这就是因为上帝只想创造6颗行星，并且上帝想通过拉开这几颗行星的轨道的距离来展现他所设计的蓝图，其原理就是他利用外接和内切球体(也就是行星运行的轨道)的技术将5个完美多面体嵌套在一个模型中。”[[150]](#footnote-150)

开普勒所提出的上述“宇宙模型”并非出于事实的发现，也非出于事实的归纳，而是出于其自然哲学思想。此模型虽然后来被裁定为错误的从而被抛弃，但在当时还是被一些人所接受。而且更为重要的是，开普勒在1600年以后，沿着新柏拉图主义的思想，将研究推进到行星绕日运动的动力、轨道以及规律上来。他的自然哲学肯定不是即将到来的机械自然观，他认为，推动行星运动的动力不是亚里士多德那样的内在的目的，也不是在他之后那些机械自然观所称的原子或微粒之间的相互作用，而是由太阳发出的，可以用数学描述的、特殊的非物质的力。基于这样的力，开普勒提出了行星运动第二定律和第一定律。

严格地说，第二定律不是被“发现”(discovery)的，即它主要不是根据观测数据“归纳”出来的，而是基于新柏拉图主义自然哲学以及“非物质性的力”的假设，被“建构”(constructed)出来的。“开普勒从作为条件(一种来自于自然哲学的智力建构)的第二定律(首先被发现的)出发，碰巧得到了第一定律(后被发现的)。因此，第二定律是他的形而上学的产物，而第一定律也不过是这种形而上学的推论而已。”[[151]](#footnote-151)

尽管开普勒行星运动定律是“建构”的而非“发现”的，但是，“根据开普勒的新柏拉图主义自然哲学，开普勒定律所描述的行星轨道及其运动是在真实空间里的真实表述，这种表述简洁而优美，因而是正确的”[[152]](#footnote-152)。

既然如此，开普勒的行星运动理论就比哥白尼的日心说以及第谷理论更优越和更真实，理应受到同时代人们的关注。

但是，事实似乎与此有所出入。与他同时代的伽利略虽然也确信哥白尼的日心说，不过，他完全没有肯定开普勒的研究并将此应用于他的研究中。他很大程度上忽略了开普勒。与他同时代的其他大多数专业天文家在自然哲学上并不信奉新柏拉图主义，因而也不认为开普勒的行星运动理论是真实的，他们所做的仍然是使用本轮和均轮来模拟并预测行星的运动。对于自然哲学家，他们中的大多数不久之后(17世纪50年代)就开始成为机械论者，而几乎所有的机械论者都接受哥白尼的日心说，因此也就接受开普勒的行星运动定律。只不过，他们会认为推动行星运动的力并非开普勒所称的非物质的力，而是由物质的微粒或原子相互碰撞所导致的机械冲击力。“所以开普勒的理论在天文学和自然哲学方面的伟大前景被割裂得支离破碎，没有人完整地理解过它。”[[153]](#footnote-153)“唯有一个人在一定程度上还原了开普勒的理论，那便是17世纪末期的牛顿，但牛顿不是以开普勒的方式，而是以他自己独特的，与开普勒不同的方式还原开普勒理论的。”[[154]](#footnote-154)至于其具体内容，在第十章“牛顿”部分将会详细叙述。

3. 伽利略的天文学观察并非完全证实了日心说

伽利略利用望远镜作出了一系列的发现。这些发现有力地支持了哥白尼的日心说，这对托勒密的地心说是一个打击。问题是：这些观察证据是否真的证实了日心说？舒斯特对此问题作了系统阐述，他认为对日心说的证实是不充分和不确定的。

第一，应用望远镜所观察到的天文现象的真实性有待进一步考证。[[155]](#footnote-155)

通过望远镜，伽利略观察到了“月球上有山脉，太阳上有黑子，木星有卫星”等现象。所有这些似乎都与亚里士多德的自然哲学体系不一致，而支持哥白尼的日心说。

但是，望远镜是一种科学仪器。科学仪器并非理论中立的，科学事实也并非中立地等着科学仪器原封不动地呈现，科学仪器是负荷理论的，科学事实也是负荷理论的，对科学仪器以及由科学仪器呈现出来的科学事实，在很多时候是存在争议的，需要科学共同体去商榷，去选择，去权衡，去解释，去对观测结果与理论预测之间的“差距”的大小和意义进行分析，以达成某种平衡。

将此落实到伽利略天文观察所用的望远镜上，它的使用并不是没有问题的：当时，望远镜运行的理论没有诞生；在用望远镜观察事物时会产生色差现象，而此现象并不能得到解释；望远镜观测到的月亮上的火山口按理说可用肉眼看到，但是人类肉眼没有看到；观测到了许多过去闻所未闻、见所未见的新事物，呈现出对当时的人们来说显得怪异的现象；等等。在这样的背景下，伽利略的望远镜并非简单地和直截了当地呈现了“自然界的事实”，望远镜的成像是可疑的，它所呈现出来的事实并非就直截了当地证明了哥白尼日心说的正确性。借此，亚里士多德派的学者以及托勒密地心说的坚守者，凭什么要相信伽利略的望远镜可以用于观测？凭什么要相信观测之后所获得的结果是可靠的？又凭什么要相信伽利略的观测结果支持乃至确立了哥白尼日心说的正确性呢？

第二，天文观察对日心说的证实和证伪都是相对的。

这里以“金星的位相”观察为例加以说明。根据哥白尼的日心说，金星和地球都是绕着太阳运行的，只是地球处于较远的轨道上运行。当太阳、地球和金星处于其他平面内，在地球上的观测者观测金星时，由于受着地球和金星的相对位置以及太阳照射金星的位置变化的影响，他们只能看到金星的一部分——或者是一小片形状的金星，或者是一半形状的金星，或者是一新月形状的金星。见图7.5。

但是，人类的肉眼没有看到金星的位相。这是什么原因呢？是哥白尼的日心说错了？哥白尼并不这么认为，反过来他认为，应该是另外一个什么原因导致了人类看不到原本可以看到的金星位相现象。最后他将这样的原因归结为“金星是透明的”。如此，他通过特设性假设消解了“反常”的观察，“拯救了”日心说。

到了伽利略那里，他对哥白尼上述构想特设性假设以拯救现象的选择视而不见，反而说哥白尼忽视了威胁日心说的人类肉眼观察不到金星位相这一现象。事实上，哥白尼并没有忽视这一现象，而且也没有像波普尔的“证伪”理论所说的那样，拒绝并且抛弃日心说。



图7.5　金星位相示意图[[156]](#footnote-156)

这是其一。其二，伽利略于1609年应用望远镜观测到了金星的位相。这对哥白尼的日心说来说应该是一个支持。不过，这种支持并不必然，因为，既然哥白尼可以通过特设性假设以拯救现象，那么我们也可以通过构建新的特设性假设来规避伽利略的金星位相观察，即认为伽利略的这一天文学观察是错误的，如此，哥白尼的日心说不能得到该天文观察的维护。

第三，观察结果对理论的支持是逻辑的和心理趋向的博弈结果。

这方面与“金星和火星视圆面形状的显著变化”问题有关。根据哥白尼的日心说理论体系，金星在距离地球最远时的视直径看起来是它距离地球最近时的视直径的6倍，火星在距离地球最远时视直径看起来是它距离地球最近时视直径的8倍，由此，金星在它距离地球最近时，其视表面面积看起来比它距离地球最远时大36倍。同理，火星在距离地球最近时，其视表面面积看起来比它距离地球最远时大64倍。但是，当时哥白尼给出的观测数据是火星离地球远近呈现的视直径大小比率为4∶1，金星离地球远近呈现的视直径大小比率为1∶1。这明显与日心说的预测不相符合。而伽利略的望远镜观测的视表面面积的结果是：“金星的约为40∶1”，“火星的约为60∶1”。在伽利略看来，这与哥白尼的日心说相一致，望远镜的观测结果确立了哥白尼学说的正确性。

深入分析伽利略的观测结果与日心说的关联，仍然可以发现，伽利略所声称的“观测结果与理论预测结果误差‘足够小’，以致可以证实哥白尼的理论预测”，仍然是有问题的。它不具有严格的逻辑学意义，只是人们的心理趋向以及争论、协商、妥协等的结果。[[157]](#footnote-157)

所有这些表明，伽利略的观察证据并非确实无疑的，这些观察证据对哥白尼日心说的证实以及对托勒密地心说的证伪也不是充分的和确定的。在这种情况下，伽利略公开捍卫哥白尼学说的正确性，呼吁人们相信这一新的理论，并以这一新的理论来对《圣经》作出新的解释，必然受到保守的宗教神学家的反对。这可以看作1616年宗教法庭的禁令以及1633年宗教法庭审判发生的根本原因。

4. 宗教法庭对伽利略的审判并非科学与宗教的对抗

对伽利略的审判意味着什么呢？一种观点认为，这是科学与宗教之间的对抗，是科学方法的有效性与宗教信仰的无效性之间，科学观察的客观性与宗教教义的主观性之间，科学寻求自主性与宗教寻求控制性之间的对抗，是科学与宗教之间的一次大搏斗。

舒斯特认为，上述观点是不恰当的。首先，科学并非与社会的各个方面无关，而是生长并发展于各个社会之中。就当时的社会而言，宗教神学仍然占据主导地位，任何对宗教神学造成冲击的东西，必然受到宗教神学的限制，就此，宗教神学对那些有悖于宗教教义的新科学的限制也就是自然的事情。我们不能借口理想化的科学的自主性观念而绝然痛斥宗教对科学的干预，将之贸然地定性为对科学的扼杀和压制。事实上，在中世纪后期，古希腊自然哲学已经成为论证宗教神学教义的有力工具，由此，自然哲学得到了进一步的发展。

其次，伽利略所用的观察仪器及其科学方法还不明确且不可置疑，所获得的观察事实还不具有不容怀疑的客观性，其对哥白尼日心说的证实还不是坚实的，托勒密的地心说也没有被有效证伪，因此，还不能绝然就说宗教法庭对伽利略的审判就是谬误对真理、迷信对理性、愚昧对启蒙、专制对民主的践踏。这一点从教会创办大学，进行科学教育以及16、17世纪耶稣会会士在中国的科学传播，就可佐证。可以说的是，宗教法庭对伽利略的审判，目的是禁止和压制伽利略对那些违背宗教教义的研究成果正确性的宣称。[[158]](#footnote-158)

在上述分析的基础上，舒斯特认为：“伽利略事件不是我们所理解的科学与宗教的对抗，而是一种科学与宗教共同体同另一种科学与宗教共同体的对抗；第谷理论依然是一种可能方案。”[[159]](#footnote-159)他的意思是，无论当时伽利略的表现还是宗教法庭的审判都是不合时宜的。伽利略并非一个纯粹的科学家，而是一个集科学与神学于一体的人。他的观察证据以及哥白尼的日心说没有被牢固确立，他也没有提出一个系统的自然哲学体系来说服人们相信它的理论，因而，不会有更多的人追随他，而作为维护了地心说的核心内涵和日心说某些优点的第谷天文学体系具有优势，被很多人接受。如果伽利略给予第谷的天文学体系以更多关注和认真对待，如果当时的欧洲不是处于欧洲历史上最紧张且处于转折关头的时期之一，即1618—1648年的30年战争时期，如果不是某些宗教人士要陷害他，那么，1633年对伽利略的法庭审判就不会发生。就此而言，宗教法庭对伽利略的审判操之过急了，主要基于政治价值判断。“伽利略事件的悲剧就在于，双方都是以不成熟的和不恰当的方式推行各自的方案。天主教会最后仓促而激烈地做出反应，并违背了教会自己的规则。伽利略违背了天主教会关于推进变革的期望；他妄言自己能涉足神学；在没有一个确定性证据的时候，他却声称拥有这样的证据，而他当时确实拥有的证据和观点并没有赢得大多数天主教会同侪的支持(虽然其中很多人被他说服了且还有更多人被他打动，但他对第谷理论的回避却是他斗争策略中的一大缺陷)。”[[160]](#footnote-160)

5. 机械自然观在日心说的接受中起着重要作用

对伽利略的审判阻碍了意大利天文学和宇宙哲学的发展，但是，在整个17世纪，自然哲学反而在意大利凭借文艺复兴的力量保持下去，并部分地得到伽利略的学生和弟子们的推进。而且，更重要的是，在意大利之外，伽利略事件并未真正阻止天文学讨论和公开辩论。如在天主教国家的法国，有很多哥白尼的追随者。笛卡尔就是其中之一。他原本打算1633年出版他的第一部系统论述机械论自然哲学的著作，但是，当他听到伽利略被审判后，决定不出版了。有人认为他主要害怕受到宗教影响，事实上是他害怕他所发表的观点因伽利略的审判而得不到广泛传播。直到1644年，他才出版了更倾向于哥白尼学说的机械论自然哲学著作——《哲学原理》(Principles of Philosophy)。[[161]](#footnote-161)

舒斯特认为，这是机械论哲学提出(大约在1620年)和确立(大约在1650年)的缘故。他指出，亚里士多德学派的人都不是哥白尼学说的信徒，有一些柏拉图主义者是哥白尼学说的信徒，而所有的机械论哲学家都是哥白尼学说的信徒。机械论哲学与哥白尼学说之间有一种紧密的联系。机械论者都相信惯性运动，因此支持哥白尼的日心说；机械论哲学都主张无限宇宙观，这与哥白尼的有限宇宙观有所不同。但是，它将哥白尼的日心说包含在内，是一种无限宇宙观的日心说。如此，机械论哲学的命运也就与哥白尼学说的命运紧密联系在一起了。“大多数情况下，机械论哲学家选择成为机械论哲学家，同时也选择了哥白尼学说，而不是在选择了哥白尼学说之后再为之创立机械论哲学。”[[162]](#footnote-162)人们接受了机械论哲学，也就接受了哥白尼的日心说。结果是，在1620—1650年之间，随着机械论哲学的提出、确立及其被人们接受，哥白尼学说也就顺理成章地被人们接受了。[[163]](#footnote-163)

(三)对德威特和舒斯特观点的评判：最终根据实在论接受日心说

德威特是根据科学哲学的理论资源来分析哥白尼日心说的提出、发展及其辩护的。德威特指出，哥白尼之所以提出日心说，原因之一是地心说的一个概念——“均衡点”的使用，具有工具论的含义而不具有实在的意义，因此应该被抛弃，就此，哥白尼是追求实在论的；在哥白尼的日心说提出后的16世纪之后半叶，经验证据还不足以支持日心说，此时人们普遍接受地心说，也是根据实在论的，当然，当时有一些人也在接受日心说，只不过更多是抱着工具论的态度接受的，即日心说并非正确的而仅仅在制作实用的天文图表上有用；第谷提出他自己的理论后，由于其既保持了地心说的核心思想又吸取了哥白尼日心说的某些观念，具有双方面的优势，因此受到广泛关注和接受，尽管其理论含有预设的成分，也就是说含有工具论的成分。特别是宗教法庭对伽利略的审判，更是以伽利略观察证据不能成立以及哥白尼日心说不正确为由进行，因此也是基于实在论的，尽管此时伽利略根据其望远镜的天文学观察事实以及他自己的理论分析，已经比较充分地证明日心说的正确性。

与德威特的上述分析不同，舒斯特根据他的论述，得到以下一系列结论：哥白尼日心说、第谷理论、开普勒行星运动理论的提出，主要不是依据观测事实或观测事实归纳“发现”的，而是基于相应的诸如新柏拉图主义等的自然哲学思想，结合相关观测事实建构的；如哥白尼的日心说提出后，并非立即就被认为是正确的并被接受，对理论的评价标准有多种，既有简洁性、精确性，还有与已知事实的一致性、被接受的知识的一致性，以及对已证实的重大事件的预测，就这些而言，哥白尼日心说在其提出后的一段时间里并无优势，也并不认为其正确而被接受；开普勒行星运动三定律的接受是复杂的，受着各个方面因素的影响，其中既有理论建构的原因，也有第谷理论已经被公众接受的原因，还有伽利略等忽视了开普勒的原因；伽利略的望远镜观察事实并非客观的、确定无疑的，其对哥白尼日心说的证实也不是充分的和确定的，其中渗透着心理和非逻辑的作用；宗教法庭对伽利略有审判并非必然，其中有各种社会因素以及当事双方不恰当的判断，这并非科学与宗教的对抗，而是一个科学与宗教共同体同另一个科学与宗教共同体的对抗……一言以蔽之，哥白尼日心说的提出及其接受并非完全像当代人所认为的那样——以事实为根据，提出科学假说；以事实为准绳，检验科学假说；科学假说被检验为正确后，上升为科学理论，被人们广泛接受。或者说，哥白尼日心说代替地心说，并非天才战胜蠢货，真理战胜谬误，科学战胜宗教的故事，而是在当时复杂的社会背景下，一系列的因素如宗教、自然哲学、理论、仪器、事实等相互作用的结果，哥白尼日心说的提出及其发展反映了社会的建构，体现了社会亚文化的争论、协商、妥协等。

不能说舒斯特的上述分析没有一点道理。但是，深入分析之后，就可发现舒斯特观点的不当。

第一，在哥白尼日心说提出后的较长一段时间里，科学还没有独立出来，科学还深蕴在宗教神学和自然哲学的文化氛围中，不可避免地要受到其影响，由其观念构建日心说不可避免，就此而言，哥白尼日心说的创立，“第谷理论”的提出，开普勒行星运动三定律的建构，都是如此。它们在很大程度上就是基于上帝伟大创造和谐世界的宗教观念，运用数学构建天文学体系以拯救现象。不过，在哥白尼、第谷、开普勒那里，天文学的经验观察并非毫无用处，无论地心说的坚持还是日心说的辩护，或者要与观察事实相一致，或者能够用此解释和预言相关的观察事实。对理论抽象的工具论的预设的避免(如哥白尼对地心说“均衡点”的思考及其抛弃等)，对观察事实的追求(如哥白尼对人类肉眼为何不能观察到“恒星视差”的解释等)，对新的观察事实的解释(如开普勒行星运动三定律对第谷天文观察事实的解释，伽利略对月亮山脉、潮汐现象、惯性运动等的观察和解释等)，都表明日心说的创立和接受并非完全是理论抽象的结果，观察事实在其中起着非常重要的作用。

第二，不可否认，在近代科学发展的早期，望远镜理论还没有确立，望远镜的观察还没有那么完美，其观察事实的客观性还没有被普遍承认，因此，对这些观察事实的怀疑的争论就不可避免。再加上当时哥白尼日心说的正确性还没有被证实，还有很多人认为其是错误的，因此，当出现一个支持其的观察事实，如“金星位相”“金星和火星视圆面面积”的望远镜观察事实出现时，人们并不是一下子就接受日心说。这两方面表明，在近代科学还没有诞生之前或者在近代科学革命的早期，科学的发展和进步是曲折的、艰难的和复杂的，对事实客观性的追求以及认识真理性的确认也是曲折的、艰难的和复杂的，但是，这并不表明那一时期的科学家(自然哲学家)对自然的认识不以追求真实(实在论)为目标。

第三，纵观近代科学革命的发生，确实是在中世纪以及之后宗教神学的背景下产生的，宗教神学确实给予了近代科学革命以一定的空间，但是，宗教毕竟是宗教，科学毕竟是科学，当科学认识与宗教法则相违背时，或者科学认识对宗教的权威造成了冲击时，宗教法庭仍然会以维护宗教神学的权威和所谓的正确，而压制和打击科学和科学家。宗教法庭对伽利略的审判说明了这一点。虽然，在这一审判过程中，宗教法庭仍然是以“伽利略所要维护的哥白尼的日心说是错误的”为理由，但是，在当时伽利略已经出版了《对话》并且给予日心说以强力支持的情况下，仍然宣判伽利略有罪，很大程度上反映了宗教神学对科学的压制。尽管这样的压制由于时代发展以及科学发展等各方面的原因效果不佳，但是，这样的压制是客观存在的。因此，宗教法庭对伽利略的审判并非一个科学和宗教共同体与另外一个科学和宗教共同体的对抗，而是宗教与科学的对抗。

总之，在那样一个时期，科学方法还没有完全确立，科学仪器还没有那样先进，科学观察或实验所获得的事实还不是那样牢固和不容怀疑，因此，作为新理论的日心说并不是一下子就战胜旧理论地心说的，而是有一个长期的博弈的过程。这一过程的进行只是表明科学认识的复杂性，科学认识有社会因素渗透，甚至在某一个时期或特殊点，科学认识的正确以及被人们相信甚至由社会决定，但是，它并不表明这样的认识永远由社会因素决定，最终，科学经验的事实，即来自科学对象的经验事实，仍然是决定人类建构的理论是否正确的重要原因。这一点从哥白尼日心说的创立，从第谷、开普勒、伽利略日心说的发展，从宗教法庭对伽利略审判，从机械自然观与日心说的接受之关联，以及从哥白尼日心说被最终接受，都可以得到佐证。因此，舒斯特依据日心说的科学知识社会史的考察，否定科学的客观性、独立性、真理性追求，是失之偏颇的。

文艺复兴时期，新柏拉图主义盛行。哥白尼受到新柏拉图主义影响以及古罗马有关地球运动与太阳中心论述的启发，提出“日心说”。“日心说”关于地球和太阳的具体观点是与宗教神学的“地心说”观点相违背的，但是其立论的神学宗教基础——“上帝创造星球是和谐的”，是与“地心说”一脉相承的，两者都是神话宗教意义上的“数学天文学”。开普勒一开始也完全遵循这样的天文学，但是，后来在天文观察事实的基础上，认识到天上的世界和地上的世界一样，也可能是不完美的，有可能有类似于力的作用，由此就将物理学、数学和原型综合于天文学研究中，创立了物理的数学天文学。伽利略更进一步，不仅通过天文观察以及相对运动为哥白尼的“日心说”辩护，而且更是悬置事物的本质，应用理想化实验，将研究集中到那些事物的可以量化的、第一性质方面，从而实现了物理学的数学化。这样的一个过程就是从“抽象的数学”到“具体的实在”的过程，是自然数学化或科学数学化的革命，为近代科学的诞生提供了思想基础和方法工具。综观哥白尼日心说从提出到被接受，是一个较为长期的过程，其中既有从工具论的到实在论的态度的转变，也有社会政治价值的考量，绝非真理与谬误、理性与迷信、科学与宗教的二分裁决那样简单。

1. [古罗马]普罗提诺：《九章集（上册）》，石敏敏译，北京：中国社会科学出版社，2018年，第114页。 [↑](#footnote-ref-1)
2. [古罗马]普罗提诺：《九章集（上册）》，石敏敏译，北京：中国社会科学出版社，2018年，第117页。 [↑](#footnote-ref-2)
3. [古罗马]普罗提诺：《九章集（上册）》，石敏敏译，北京：中国社会科学出版社，2018年，第117页。 [↑](#footnote-ref-3)
4. 王海琴：《“哥白尼革命”的另一种解读——从数学哲学的角度看》，《自然辩证法研究》，2005年第9期，第21页。 [↑](#footnote-ref-4)
5. 王海琴：《“哥白尼革命”的另一种解读——从数学哲学的角度看》，《自然辩证法研究》，2005年第9期，第21页。 [↑](#footnote-ref-5)
6. 这一原则指的是，任何天体都是做匀速圆周运动的，虽然实际的观测所获得的天体运行图像(又叫“视运动”)与此不一致，但是，天文学家必须以此为原则，运用相关的数学知识和前提假定如本轮、均轮等，构建出与视运动相合的理论模型。这样的理论模型才是星球真正的运动图像。这体现了柏拉图数学天文学的思想，也是托勒密、哥白尼等数学天文学家所追求的。 [↑](#footnote-ref-6)
7. [英]戴维·伍顿：《科学的诞生：科学革命新史》(上册)，刘国伟译，北京：中信出版社，2018年，第168页。 [↑](#footnote-ref-7)
8. [英]丹皮尔：《科学史及其与哲学和宗教的关系》，李珩译，北京：中国人民大学出版社，2010年，第123页。 [↑](#footnote-ref-8)
9. 罗兴波：《17世纪下半叶英国科学研究方法的转变》，《中国科技史杂志》，2011年第1期，第49页。 [↑](#footnote-ref-9)
10. [英]丹皮尔：《科学史及其与哲学和宗教的关系》，李珩译，北京：中国人民大学出版社，2010年，第123页。 [↑](#footnote-ref-10)
11. “人生活在地球上，无时无刻不参与地球的运动。人们所观测到的天体在天球上的位置称为视位置，而把视位置的变化称为视运动，它是地球自身运动和天体实际运动两者的综合观测效应。天文学家需要，也只能通过观测到的天体的视运动特征，来探求它们的实际运动状况，进而研究其种种性质。”(参见晓泓：《天体视运动的规律》，《科学》，2008年第5期，第57页。) [↑](#footnote-ref-11)
12. 亦可称为“可公度性”、“可通度性”或“可通约性”。可公度性是指如果两个量可合并计算，那么它们可以用同一个单位来衡量。 [↑](#footnote-ref-12)
13. [波]哥白尼：《天球运行论》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第xxx-xxxi页。 [↑](#footnote-ref-13)
14. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第64-65页。 [↑](#footnote-ref-14)
15. [美]艾伦·G. 狄博斯：《文艺复兴时期的人与自然》，周雁翎译，上海：复旦大学出版社，2000年，第99页。 [↑](#footnote-ref-15)
16. 埃克番图斯(Ephantus)是一个神秘的希腊前苏格拉底哲学家。他可能根本就不存在。他被认为是公元前4世纪的毕达哥拉斯学派，也是日心说的支持者。来自锡拉库扎的描述，这可能是，也可能不是被证实的克罗顿的埃克番图斯。 [↑](#footnote-ref-16)
17. [波]哥白尼：《天球运行论》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第xxxii页。 [↑](#footnote-ref-17)
18. “可见的神”的观念是哥白尼受文艺复兴时期赫尔墨斯主义魔法和新柏拉图主义神秘主义的影响而提出的，将“可见的神”的概念运用于“太阳”属于哥白尼无心之错(因为记忆出了错)，因为“可见的神”的概念指的是“可知觉的宇宙”。(参见[波]哥白尼：《天球运行论》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第36、608页。) [↑](#footnote-ref-18)
19. [美]兰西·佩尔斯、查理士·撒士顿：《科学的灵魂——500年科学与信仰、哲学的互动史》，潘柏滔译，南昌：江西人民出版社，2006年，第66页。 [↑](#footnote-ref-19)
20. [美]库恩：《哥白尼革命：西方思想发展中的行星天文学》，吴国盛、张东林、李立译，北京：北京大学出版社，2003年，第129页。 [↑](#footnote-ref-20)
21. [美]兰西·佩尔斯、查理士·撒士顿：《科学的灵魂——500年科学与信仰、哲学的互动史》，潘柏滔译，南昌：江西人民出版社，2006年，第65-66页。 [↑](#footnote-ref-21)
22. [波]哥白尼：《天球运行论》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第36页。 [↑](#footnote-ref-22)
23. [美]I. B. 科恩：《新物理学的诞生》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第39页图11。标题为笔者所加。 [↑](#footnote-ref-23)
24. [波]哥白尼：《天球运行论》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第xxxii-xxxiii页。 [↑](#footnote-ref-24)
25. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第39页。 [↑](#footnote-ref-25)
26. [波]哥白尼：《天球运行论》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第5页。 [↑](#footnote-ref-26)
27. 可称为周日运动，亦为周日视运动，是描述地球上的观测者每天观测到天空上的天体明显的视运动状态。这是地球绕轴自转使然，使得所有天体都绕着这个轴(从观测者眼中即绕着北极星)做圆周运动，这个圆圈称周日圈。日、月的东升西落就是周日运动的体现。 [↑](#footnote-ref-27)
28. [波]哥白尼：《天球运行论》，张卜天译，北京：商务印书馆，2016年，第16-17页。 [↑](#footnote-ref-28)
29. 原文就是“日静说”。至于“日静说”，我国有学者指出：“然而，库恩深刻地指出，日心说仅仅是在理论层面上具备这种简单和谐的美感。由于哥白尼和托勒密一样执意认为天体在圆球上做匀速运动，如果仍要‘拯救现象’，让日心说体系与实际观测相吻合，那么他也不可避免要引入一大套圆球，而且还要假设太阳不在宇宙正中，而是偏于一侧(因此他的‘日心说’严格说来其实是‘日静说’)。”(参见刘夙：《万年的竞争：新著世界科学技术文化简史》，北京：科学出版社，2017年，第4页。) [↑](#footnote-ref-29)
30. [英]约翰·亨利：《科学革命与现代科学的起源》(第3版)，杨俊杰译，北京：北京大学出版社，2013年，第37-38页。 [↑](#footnote-ref-30)
31. [英]约翰·亨利：《科学革命与现代科学的起源》(第3版)，杨俊杰译，北京：北京大学出版社，2013年，第38页。 [↑](#footnote-ref-31)
32. [意]伽利略：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，周煦良等译，北京：北京大学出版社，2006年，第177页。 [↑](#footnote-ref-32)
33. 需要指明的一点是，尽管在哥白尼的体系中大小轮子的数量减少了，并且没有借助本轮就对行星运动做出定性解释，对于只考虑行星定性运动的天文学家来说，哥白尼体系肯定经济得多，但是，在作出定量解释的时候，哥白尼也需要求助于小本轮和偏心圆，在这个意义上，哥白尼体系和托勒密体系的准确度和经济性其实差不多，又显得比托勒密体系更复杂，实际上也没有解决问题。所以对哥白尼日心说的“简单性”分析，也应当全面客观。当然，总体而言，哥白尼的“日心说”几何体系要比那一时期托勒密的“地心说”几何体系简单和谐。 [↑](#footnote-ref-33)
34. [美]兰西·佩尔斯、查理士·撒士顿：《科学的灵魂——500年科学与信仰、哲学的互动史》，潘柏滔译，南昌：江西人民出版社，2006年，第66页。 [↑](#footnote-ref-34)
35. [美]兰西·佩尔斯、查理士·撒士顿：《科学的灵魂——500年科学与信仰、哲学的互动史》，潘柏滔译，南昌：江西人民出版社，2006年，第67页。 [↑](#footnote-ref-35)
36. [美]库恩：《哥白尼革命：西方思想发展中的行星天文学》，吴国盛、张东林、李立译，北京：北京大学出版社，2003年，第130页。 [↑](#footnote-ref-36)
37. 吴以义：《从哥白尼到牛顿：日心学说的确立》，上海：上海人民出版社，2013年，第4页。 [↑](#footnote-ref-37)
38. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 73. [↑](#footnote-ref-38)
39. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 73. [↑](#footnote-ref-39)
40. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第173页。 [↑](#footnote-ref-40)
41. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 73. [↑](#footnote-ref-41)
42. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 73. [↑](#footnote-ref-42)
43. Henry J. A Short History of Scientific Thought. New York: Palgrave Macmillan, 2012: 73. [↑](#footnote-ref-43)
44. “原型”这一术语早在斐洛·犹大乌斯(Philo judaeus，约公元前20—公元45年)时代便出现了，在希腊语中是archetypes，可以解释为“最初的模型”，意指人身上的上帝形象。在古希腊，上帝被称作“原型之光”，古希腊著作中出现了“非物质原型”和“原型石”等术语。在圣·奥古斯丁的著述中，“它们并非是自发形成的而是容身于神知之中”。“原型”是对柏拉图理念的解释性释义。(参见[瑞士]荣格：《原型与集体无意识》(第五卷)，徐德林译，北京：国际文化出版公司，2011年，第6页。) [↑](#footnote-ref-44)
45. Stephenson B. The Music of the Heavens: Kepler’s Harmonic Astronomy. Princeton: Princeton University Press, 1994: 242. [↑](#footnote-ref-45)
46. Kozhamthadam J. The Discovery of Kepler’s Laws. London: University of Notre Dame Press, 1994. [↑](#footnote-ref-46)
47. Goldstein B R. What’s new in Kepler’s new astronomy?//Earman J, Norton D J. The Cosmos of Science. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1997: 4-12. [↑](#footnote-ref-47)
48. 王国强：《新天文学的起源——开普勒物理天文学研究》，北京：中国科学技术出版社，2010年。 [↑](#footnote-ref-48)
49. Kepler J. The Secret of the Universe. Duncan A M(trans.). London: Abaris Books, Inc., 1981: 63. [↑](#footnote-ref-49)
50. 正多面体，亦称柏拉图正多面体、柏拉图立体，即在几何体中，有且只有五个正多面体的存在：立方体、正四面体、正十二面体、正二十面体和正八面体。 [↑](#footnote-ref-50)
51. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第47页。 [↑](#footnote-ref-51)
52. [美]I. 伯纳德·科恩：《新物理学的诞生》，张卜天译，北京：商务印书馆出版社，2016年，第133页图26。该图取自开普勒1956年的《宇宙的奧秘》。 [↑](#footnote-ref-52)
53. 在早期，开普勒完全基于“原型”，建构了“5个柏拉图正多面体正好镶嵌在6个行星天球之间”的宇宙模型。后来，开普勒在分析第谷的观察数据、制定行星运行表时，认识到这一模型是不正确的，因此，就摒弃了这一宇宙模型。尽管如此，与让开普勒声名远播的“三定律”相比较，开普勒更喜欢这种设计奇特的包含着五种层层嵌套的正多面体模型。 [↑](#footnote-ref-53)
54. [荷]E. J. 戴克斯特豪斯：《世界图景的机械化》，张卜天译，北京：商务印书馆，2015年，第425页。 [↑](#footnote-ref-54)
55. Kepler J. The Secret of the Universe. Duncan A M(trans.). London: Abaris Books, Inc., 1981: 97. [↑](#footnote-ref-55)
56. Koyre A. The Astronomical Revolution. Maddison R W(trans.). New York: Dover Publication, Inc., 1973: 122. [↑](#footnote-ref-56)
57. “对位点”的概念——该点位于地球相对于均轮中心的反方向，且到均轮中心的距离与地球到该中心的距离相等；同时假定行星本轮的中心以恒定角速率环绕对位点运行。 [↑](#footnote-ref-57)
58. 有关开普勒发现行星运动三定律的具体内容，请参见王国强：《新天文学的起源——开普勒物理天文学研究》，北京：中国科学技术出版社，2010年，第71-105页。本书不再赘述。 [↑](#footnote-ref-58)
59. 王国强：《新天文学的起源——开普勒物理天文学研究》，北京：中国科学技术出版社，2010年，第105页。 [↑](#footnote-ref-59)
60. Holton G. Thematic Origins of Scientific Thought, Kepler to Einstein. Revised Edition. Cambridge and London: Harvard University Press, 1988: 54. [↑](#footnote-ref-60)
61. Holton G. Thematic Origins of Scientific Thought, Kepler to Einstein. Revised Edition. Cambridge and London: Harvard University Press, 1988: 70. [↑](#footnote-ref-61)
62. Kozhamthadam J. The Discovery of Kepler’s Laws. London: University of Notre Dame Press, 1994: 191-193. [↑](#footnote-ref-62)
63. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第8页。 [↑](#footnote-ref-63)
64. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第249-250页。 [↑](#footnote-ref-64)
65. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第12页。 [↑](#footnote-ref-65)
66. 转引自[英]戴维·伍顿：《科学的诞生：科学革命新史》(下册)，刘国伟译，北京：中信出版社，2018年，第537页。 [↑](#footnote-ref-66)
67. Kepler J. New Astronomy. Donahue W H(trans.). Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 390-391. [↑](#footnote-ref-67)
68. 转引自[荷]E. J. 戴克斯特豪斯：《世界图景的机械化》，张卜天译，北京：商务印书馆，2015年，第433页。原文出自：Kepler J. Das Weltgeheimnis(Mysterium Cosmographicum), übers. und eingel. von Max Caspar. Munich-Berlin, 1936. [↑](#footnote-ref-68)
69. Kepler J. The Secret of the Universe. Duncan A M(trans.). London: Abaris Books, Inc., 1981: 199. [↑](#footnote-ref-69)
70. 王国强：《新天文学的起源——开普勒物理天文学研究》，北京：中国科学技术出版社，2010年，第26页。 [↑](#footnote-ref-70)
71. Stephenson B. Kepler’s Physical Astronomy. Princeton: Princeton University Press, 1994: 72. [↑](#footnote-ref-71)
72. Kepler J. The Secret of the Universe. Duncan A M(trans.). London: Abaris Books, Inc., 1981: 201. [↑](#footnote-ref-72)
73. 该书也被称作《以对火星运动的评论表达的新天文学或天空物理学》，或被称作《论火星的运动》以及《论火星》。 [↑](#footnote-ref-73)
74. 王国强：《新天文学的起源——开普勒物理天文学研究》，北京：中国科学技术出版社，2010年，第26页。 [↑](#footnote-ref-74)
75. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第9-12页。 [↑](#footnote-ref-75)
76. Kepler J. New Astronomy. Donahue W H(trans.). Cambridge: Cambridge University Press, 1992. [↑](#footnote-ref-76)
77. 这里指的是托勒密的地心说理论、哥白尼的日心说理论以及第谷对行星运动的观察。 [↑](#footnote-ref-77)
78. Kepler J. New Astronomy. Donahue W H(trans.). Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 48. [↑](#footnote-ref-78)
79. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第7页。 [↑](#footnote-ref-79)
80. Kepler J. Harmonies of the World. Edited, with Commentary, by Stephen hawking. London: Running Press, 2002: 14. [↑](#footnote-ref-80)
81. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第85页。 [↑](#footnote-ref-81)
82. [荷]H. 弗洛里斯·科恩：《世界的重新创造：近代科学是如何产生的》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第85页。 [↑](#footnote-ref-82)
83. [美]查尔斯·赫梅尔：《自伽利略之后：圣经与科学之纠葛》，闻人杰等译，银川：宁夏人民出版社，2008年，第51页。 [↑](#footnote-ref-83)
84. [美]查尔斯·赫梅尔：《自伽利略之后：圣经与科学之纠葛》，闻人杰等译，银川：宁夏人民出版社，2008年，第47页。 [↑](#footnote-ref-84)
85. Kepler J. Gesammelte Werke. Band III. Astronomia Nova. Hrsg v. Max Caspar. Munchen, 1937: 5. [↑](#footnote-ref-85)
86. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第13-14页。 [↑](#footnote-ref-86)
87. [英]柯林武德：《自然的观念》，吴国盛译，北京：商务印书馆，2018年，第128页。 [↑](#footnote-ref-87)
88. [英]史蒂文·夏平：《科学革命：批判性的综合》，徐国强、袁江洋、孙小淳译，上海：上海科技教育出版社，2004年，第32页。 [↑](#footnote-ref-88)
89. 转引自Holton G. Thematic Origins of Scientific Thought, Kepler to Einstein. Revised Edition. Cambridge and London: Harvard University Press, 1988: 56. [↑](#footnote-ref-89)
90. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第8页。 [↑](#footnote-ref-90)
91. [德]克劳斯·迈因策尔：《复杂性思维：物质、精神和人类的计算机动力学》，曾国屏、苏俊斌译，上海：上海辞书出版社，2013年，第37页。 [↑](#footnote-ref-91)
92. 转引自Schlagel R H. Three Scientific Revolutions: How They Transformed Our Conceptions of Reality. New York: Humanity Books, 2015: Chapter Ⅱ. [↑](#footnote-ref-92)
93. 本部分主要参考肖显静：《伽利略物理学数学化哲学思想基础析论》，《江海学刊》，2012年第1期，第53-62页。 [↑](#footnote-ref-93)
94. 此处的“A. 柯依列”实际上就是“柯瓦雷”，只是译者的人名翻译不同而已。 [↑](#footnote-ref-94)
95. [法]A. 柯瓦雷：《伽利略研究》，刘胜利译，北京：北京大学出版社，2008年，第318页。 [↑](#footnote-ref-95)
96. [英]史蒂文·夏平：《科学革命：批判性的综合》，徐国强、袁江洋、孙小淳译，上海：上海科技教育出版社，2004年，第28页。 [↑](#footnote-ref-96)
97. [英]史蒂文·夏平：《科学革命：批判性的综合》，徐国强、袁江洋、孙小淳译，上海：上海科技教育出版社，2004年，第28-29页。 [↑](#footnote-ref-97)
98. [法]A. 柯瓦雷：《伽利略研究》，刘胜利译，北京：北京大学出版社，2008年，第332页。 [↑](#footnote-ref-98)
99. 转引自[美]M. 克莱因：《古今数学思想》(第一册)，张理京、张锦炎、江泽涵等译，上海：上海科学技术出版社，2014年，第273页。 [↑](#footnote-ref-99)
100. Pitt J C. Galileo, Human Knowledge, and the Book of Nature: Method Replaces Metaphysics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. [↑](#footnote-ref-100)
101. Wallace W A. Galileo’s Logic of Discovery and Proof: The Background, Content, and Use of His Appropriated Treatises on Aristotle’s Posterior Analytics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992: 220. [↑](#footnote-ref-101)
102. Wallace W A. Galileo’s Logic of Discovery and Proof: The Background, Content, and Use of His Appropriated Treatises on Aristotle’s Posterior Analytics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992: 220. [↑](#footnote-ref-102)
103. [英]S. 德雷克：《伽利略》，唐云江译，北京：中国社会科学出版社，1987年，第159页。 [↑](#footnote-ref-103)
104. [意]伽利略：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，周煦良等译，北京：北京大学出版社，2006年，第80页。 [↑](#footnote-ref-104)
105. D Levere T H, Shea W R. Nature, Experiment, and the Sciences: Essays on Galileo and the History of Science in Honour of Stillman Drake. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 124. [↑](#footnote-ref-105)
106. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第68页。转引自Galilei G. Dialogues Concerning the Two Great Systems of the World. Salusbury T(trans.). Vol. Ⅰ, London, 1661: 96. [↑](#footnote-ref-106)
107. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第68页。转引自Galilei G. Dialogues Concerning the Two Great Systems of the World. Salusbury T(trans.). Vol. Ⅰ, London, 1661: 305. [↑](#footnote-ref-107)
108. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第68页。转引自Galilei G. Dialogues Concerning the Two Great Systems of the World. Salusbury T(trans.). Vol. Ⅰ, London, 1661: 308. [↑](#footnote-ref-108)
109. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，北京：商务印书馆，2018年，第68页。 [↑](#footnote-ref-109)
110. “书中以三个人对话的形式讨论关于托勒密地心说和哥白尼日心说哪个正确的问题。其中一个人叫辛普利邱，代表托勒密；另一个人叫菲利普·萨尔维阿蒂，代表哥白尼；还有一个‘街上人’叫沙格列陀，对前两人讨论作出判断，这位公正人实际上代表伽利略自己。表面上好像看不出伽利略本人站在哪一边，而从事实和论据两方面都强有力地支持了哥白尼学说，同时严厉地批判了亚里士多德和托勒密的错误理论。”(参见[意]伽利略：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，周煦良等译，北京：北京大学出版社，2006年，第11页。) [↑](#footnote-ref-110)
111. [意]伽利略：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，周煦良等译，北京：北京大学出版社，2006年，第139页。 [↑](#footnote-ref-111)
112. [美]艾伦·G. 狄博斯：《文艺复兴时期的人与自然》，周雁翎译，上海：复旦大学出版社，2000年，第128页。 [↑](#footnote-ref-112)
113. 转引自Schlagel R H. Three Scientific Revolutions：How They Transformed Our Conceptions of Reality-Humanity Books. 2015: Chapter Ⅱ. 原文出自：Galileo Galilei. *The Assayer*, reprinted in Drake and O'Malley. *The Controversy on the Comets of 1618:* 311. The subsequent parenthetical citation is also to this work. [↑](#footnote-ref-113)
114. Whitehead A N. Science and the Modern World. New York: The New American Library ot World Literature, Inc., 1997: 56. [↑](#footnote-ref-114)
115. 需要说明的是，伽利略在物理学数学化过程中，对亚里士多德探求本质原因的悬置以及将研究集中到事物的第一性质上，是有原因的。当列奥那多(Leonardo)的机器，尼古拉斯·塔塔利亚(Nicholas Tartaglia)的机械解释和阿基米德的复兴，作为同一复杂思想的一部分(强调可预测的大自然内部的互相作用的机械力)，(参见Kearney H. Science and Change 1500-1700. McGraw-Hell Book Company Reprinted，1981.)在文艺复兴时的意大利出现时，那种“对自然现象的机械解释”给伽利略带来的影响无疑是深刻的——“阿基米德(Archimedes)式机械主义情结”持续“在更广阔范围中起主导作用”，以至“持续至他的余生”。(参见宋俊龙、高永兰：《哥白尼与伽利略科学思想比较——从二人承袭的传统角度分析》，《卷宗》，2015年第5期，第556页。)但是，必须清楚，上述行为并不表明伽利略抛弃了亚里士多德的自然内在目的论和万物有灵论，持有机械自然观的观点。他进行这样的处理，可能只是在方法论的意义上，一定程度上出于物理学数学化的现实需要。当然，在这样认识事物的过程中，它使人们聚焦于事物的机械的方面，忽略或者不考虑事物的有机方面，事实上导致的是人们将事物作为机械处理了，由此是能够将人们引向机械自然观的，把自然看作一个机械式的存在。 [↑](#footnote-ref-115)
116. 这表明对物理对象运动及其特征的描述和解释的词汇，反映了使用该词汇的科学家的世界观和方法论。在近代被创造出来的这些区别于亚里士多德物理学的新词项，被赋予了新的意义，本身带有形而上学的先验色彩。 [↑](#footnote-ref-116)
117. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第12页。 [↑](#footnote-ref-117)
118. [美]埃德温·阿瑟·伯特：《近代物理科学的形而上学基础》，张卜天译，长沙：湖南科学技术出版社，2012年，第85页。 [↑](#footnote-ref-118)
119. [意]伽利略：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，周煦良等译，北京：北京大学出版社，2006年，第141页。 [↑](#footnote-ref-119)
120. [意]伽利略：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，周煦良等译，北京：北京大学出版社，2006年，第144-145页。 [↑](#footnote-ref-120)
121. [英]迈克尔·霍斯金：《科学家的头脑：假想的与伽利略、牛顿、赫歇尔、达尔文及巴斯德的谈话》，郭贵春、邹范林、王道君译，北京：华夏出版社，1990年，第13页。 [↑](#footnote-ref-121)
122. 王贵友：《科学技术哲学导论》，北京：人民出版社，2005年，第295-296页。 [↑](#footnote-ref-122)
123. [美]理查德·韦斯特福尔：《近代科学的建构：机械论与力学》，张卜天译，北京：商务印书馆，2020年，第27页。 [↑](#footnote-ref-123)
124. [美]伦纳德·蒙洛迪诺：《思维简史：从丛林到宇宙》，龚瑞译，北京：中信出版社，2018年，第125页。 [↑](#footnote-ref-124)
125. Schlagel R H. Three Scientific Revolutions: How They Transformed Our Conceptions of Reality. New York: Humanity Books 2015: Chapter Ⅱ. [↑](#footnote-ref-125)
126. Clavelin M. The Natural Philosophy of Galileo: Essay on the Origins and Formation of Classical Mechanics. Pomerans A J(trans.). Cambridge: The MIT Press, 1974: 383. [↑](#footnote-ref-126)
127. 此处，“实在论”的英文为realism，在译著《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版，2020)中被译为“现实主义”，这是不恰当的；至于realist被译为现实主义者也是不恰当的，应该译作“实在论者”。 [↑](#footnote-ref-127)
128. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第91-99页。 [↑](#footnote-ref-128)
129. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第170页。 [↑](#footnote-ref-129)
130. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第174-175页。 [↑](#footnote-ref-130)
131. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第175页。 [↑](#footnote-ref-131)
132. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第178页图15-1。 [↑](#footnote-ref-132)
133. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第179页。 [↑](#footnote-ref-133)
134. 拉卡托斯在《科学研究纲领方法论》中认为，科学中的基本单位和评价对象不应是一个个孤立的理论，而应是在一个时期中由一系列理论有机构成的研究纲领。这一研究纲领由“硬核”和“保护带”构成。所谓“硬核”指的是理论的基本原理，它不容经验反驳，如果遭到反驳，整个研究纲领就遭到反驳，放弃“硬核”就意味放弃了整个研究纲领；所谓“保护带”，指的是围绕在硬核周围的许多辅助性假设、初始条件、边界条件等，可以对此进行相应的调整、修改，以保持“硬核”不变。鉴此，在科学研究过程中，可以在遵守“反面启示法”的原则下，即在不放弃或修改研究纲领的“硬核”的前提下，采用“正面启示法”，修改辅助性假说、前提条件和边界条件等，以保持“硬核”成立。([英]伊姆雷·拉卡托斯：《科学研究纲领方法论》，兰征译，上海：上海译文出版社，2005年。) [↑](#footnote-ref-134)
135. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第179页。 [↑](#footnote-ref-135)
136. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第192页。 [↑](#footnote-ref-136)
137. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第210页。 [↑](#footnote-ref-137)
138. 转引自[美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第210-211页。 [↑](#footnote-ref-138)
139. [美]艾伦·G. 狄博斯：《文艺复兴时期的人与自然》，周雁翎译，上海：复旦大学出版社，2000年，第116页。 [↑](#footnote-ref-139)
140. [意]伽利略：《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，周煦良译，北京：北京大学出版社，2006年。 [↑](#footnote-ref-140)
141. [美]理查德·德威特：《世界观：现代人必须要懂的科学哲学和科学史》(原书第3版)，孙天译，北京：机械工业出版社，2020年，第216页。 [↑](#footnote-ref-141)
142. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第116-125页。 [↑](#footnote-ref-142)
143. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第136-137页。 [↑](#footnote-ref-143)
144. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第142页。 [↑](#footnote-ref-144)
145. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第113页图7.1。 [↑](#footnote-ref-145)
146. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第227页。 [↑](#footnote-ref-146)
147. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第228页。 [↑](#footnote-ref-147)
148. 第谷天文学体系不仅被当时的人们普遍支持，而且还受到当代某些信奉《圣经》的宗教信徒的支持。他们以“行星在椭圆轨道上以不同速度运动”这一思想修正第谷的天文学体系，维护了“地球是宇宙的中心”这一宗教教义。 [↑](#footnote-ref-148)
149. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第228页。 [↑](#footnote-ref-149)
150. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第241页。 [↑](#footnote-ref-150)
151. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第249页。 [↑](#footnote-ref-151)
152. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第247页。 [↑](#footnote-ref-152)
153. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第257页。 [↑](#footnote-ref-153)
154. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第257页。 [↑](#footnote-ref-154)
155. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第269-277页。 [↑](#footnote-ref-155)
156. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第262页。 [↑](#footnote-ref-156)
157. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第263-264页。 [↑](#footnote-ref-157)
158. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第353-355页。 [↑](#footnote-ref-158)
159. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第51页。 [↑](#footnote-ref-159)
160. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第354-355页。 [↑](#footnote-ref-160)
161. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第350-351页。 [↑](#footnote-ref-161)
162. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第372页。 [↑](#footnote-ref-162)
163. [澳]约翰·A. 舒斯特：《科学史与科学哲学导论》，安维复主译，上海：上海科技教育出版社，2013年，第371-373页。 [↑](#footnote-ref-163)