

The background of the cover is a dark, starry space. In the upper right, there is a large, bright, glowing nebula or galaxy core with colors ranging from yellow to red. In the lower left, a small, reddish-brown planet or moon is visible, partially obscured by the dark space.

THE STATE OF
THE UNIVERSE

宇宙的状态

现代宇宙学入门

[英] 佩德罗·G. 费雷拉 著 赵舒静 译

上海科学技术文献出版社



宇宙的状态

现代宇宙学入门



上海科学技术文献出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

宇宙的状态:现代宇宙学入门/(英)佩德罗·G.费雷拉著;
赵舒静译. --上海:上海科学技术文献出版社, 2011. 1
ISBN 978-7-5439-4608-8

I. ①字… II ①佩… ②赵… III. ①宇宙学
IV. ①P159

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第241527号

The State of the Universe

Copyright © 2007 by Pedro Ferreira
Copyright licensed by Conville & Walsh Limited
arranged with Andrew Nurnberg Associates International Limited
Copyright in the Chinese language translation (Simplified character rights only) ©
2011 Shanghai Scientific & Technological Literature Publishing House

All Rights Reserved

版权所有, 翻印必究

图字: 09-2008-594

责任编辑: 张 树 李 莺

封面设计: 许 菲

宇宙的状态

——现代宇宙学入门

[英]佩德罗·G.费雷拉 著

赵舒静 译

*

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市长乐路746号 邮政编码200040)

全国新华书店经销

江苏常熟市人民印刷厂印刷

*

开本740X970 1/16 印张15.25 字数196 000

2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5439-4608-8

定价: 30.00元

<http://www.sstlp.com>

导 读

我是一名宇宙学家。我的工作是结合利用数学工具、高端望远镜的观测结果和有依有据的推测（这一点最为重要）来努力揭秘宇宙的历史和运动。运用这类方法所进行的研究中，宇宙是你所能想到的最大的事物了。这项任务中，即使只是天马行空的狂想也能影响所有相关的人。这十年里，我们对于宇宙的认识可谓突飞猛进，而我正好有幸在这样的时期展开我的科研生涯。对于研究机构而言，每周都开研讨会是很正常的事，会上，我常会获悉一些惊人的突破：我们发现了无比遥远的星系，我们现在看到的它们还停留于宇宙诞生初期的模样；我们有证据证明空间和时间的扭曲，这样的扭曲使得光线像是在装了镜子的大房间里行进一样；我们还利用埋在山洞里的一种仪器发现了新的物质形态。例子不胜枚举。宇宙学带来的欣喜可不仅限于大学和科研实验室中。消息传得很快。没过几周，报纸、广播和电视就会大肆宣传新的进展。显眼的大字标题、印制精美的图片和专家权威的言论让普通大众对幕后的种种略知一二。

但凡我们这些投身于此的人，都是受到了“我们已经成功破解了宇宙密码”这种想法的驱使。这般的妄自尊大也是可以理解的。我们能够运用基本原理预言浩瀚宇宙的某些特征，而且这些特征可在日后观测到。我们可以沾沾自喜地将宇宙学和预测天气情况的气象学相提并论。拥有了从气球和卫星迅速采集数据的能力后，我们处理数据的能力也与日俱增，气象学已经有了长足的发展。然而我们明白，尽管我们手头

有着海量资源，却仍然会犯下大错。我们能做的充其量不过是预测几天之内地球上会是什么天气。相比之下，我们目前的宇宙模型就成功得多了，它能在更简单却更精确的框架内描述几十亿年来宇宙的状况。

简单和明确是物理学中常见的两个概念。当我们探讨的想法既容易理解也容易呈现时，这两个概念就是评判标准。基础物理学的目标之一便是用最少的等式作最多的描述，每个等式都要简单明确。宇宙膨胀说（或者说大爆炸宇宙学）在这方面就做得相当不错。它使建立在高度假设基础上的研究方式得到了认可，而这样的研究方式也正激发出大量新想法和新途径。或许和物理学的其他领域相比更是如此吧，宇宙学家构建出想象的世界，希望这样的世界与我们所观测到的事物有一定联系。他们希望和爱因斯坦一样，在拓展想象的同时紧紧围绕基本原理，这样也许就能解释宇宙学中诸多未有答案的问题了。

且听我继续往下说。为了跟上所有的新发现，宇宙的运作模型在过去的几十年中复杂了许多。从某种程度而言，这是桩好事。我们描述宇宙的能力突飞猛进，我们现在有能力对宇宙的种种特性作更为精确的测量。在科学领域取得进步，我们必须得有可靠的实验数据来验证我们的理论。然而，一些令人吃惊的结果浮出了水面。比方说，有可靠证据表明宇宙中存在的物质比我们看到的要多：某些暗物质对于我们在天空中观察到的万物的进化都起着重要的作用。此外，暗物质大多异乎寻常，它们所具备的特性是在实验室里从未目睹过的。换句话说，我们并不知道它们是什么。如果说如此难以捉摸、异乎寻常的东西却扮演着如此重要的角色，那么我们又哪来的底气说我们成功地认识了宇宙？

这本书旨在向你介绍有关宇宙学的标准知识。我们将阐述宇宙理论的基本观点，探讨过去的一百年甚至更长的这段时间里某些重要的发现和概念上的突破。当我们将观测所得和理论预测相比较的时候，为什么这个领域总是欣喜不断，为什么宇宙学在现代科学中能占据中心地位、

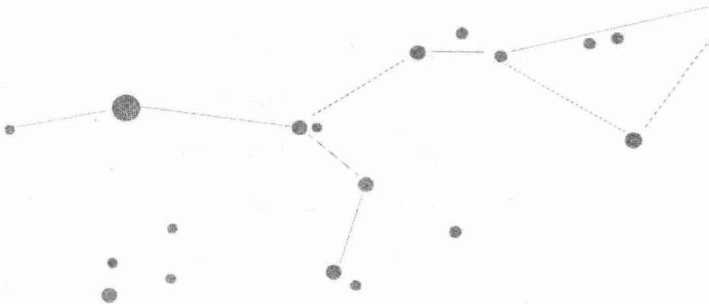
吸引众多爱好者的目光，就都变得显而易见了。不过在建立宇宙当前的模型时，我们也无法忽视那些放不进“拼图”的新部件。无法解释的现象必须借助最初假设范围之外、新的物理原理，才能被纳入“拼图”之中。到头来，你对这幅完整的画面会持有截然相反的两种观点。你也许会觉得我们现有的宇宙模型实在是太强势了，以至于就算不得不作调整，也不过是些小修小补罢了。或者，你也许会觉得这些修补格格不入，认为模型的什么地方出了大问题：我们或许正站在另一场科技革命的门槛之上。

目 录

导读	1
1. 机械的宇宙	1
2. 天空有多高?	17
3. 阿尔伯特·爱因斯坦与时空之布局	30
4. 进化的宇宙	48
5. 遥远星系的退行	63
6. 高温的初始阶段和宇宙光球层	72
7. 原始火球中轻元素的由来	87
8. 恒星的神秘变幻	97
9. 基本作用力与物质的起源	111
10. 引力让不可见的事物现身	124
11. 暗物质与另类物质	134
12. 加速的宇宙?	146
13. 暗能量是第五要素	158
14. 从有序到混沌	168
15. 原始的声音	181
16. 星系之生态学	194
17. 卷绕与变形	204
18. 最初之时?	217

1

机械的宇宙



宇宙学是关于宇宙起源和进化的科学。对于什么是“宇宙”，我们的观念随着时间的推移发生了变化，这是理论上先入为主的判断和观测上的突破相互影响的结果，不足为怪。西方宇宙学的历史以独特的视角向我们呈现了这种相互间的影响：这段历史始于希腊人和他们的“地心说”，接着是哥白尼和伽利略带来观念上飞跃的“日心说”，巅峰是艾萨克·牛顿结合了物理学规律的开创性理论。在这一章里，我们将探索这段历史中的某些主要事件。尽管我们不会深入研究古巴比伦人或古代亚洲思想家的先进学说，但就算仅限于西方宇宙学说的狭小范畴内，我们也会大有收获。在此框架内，我们可以来介绍一些贯穿本书始终的核心观念。

希腊宇宙学和以地球为中心的宇宙

我们的故事要从古希腊讲起。当时主要观测些什么呢？天空中的太阳、几颗行星、零星的星辰，当时的宇宙仅限于此。可见的宇宙只不过是太阳系的一角，外加一张点缀着星辰的背景黑幕。星辰的相对位置看起来是完全静止的，仿佛是嵌在了宇宙天球中。星空看似围绕地球而动，每颗星都在天空中滑出一条轨道。每颗星的亮度好像也是不变的——它们看起来并不会随着时间的推移变亮或变暗。不过与此同时，

它们似乎又近在咫尺，有大有小，而不仅仅是天空里的针眼儿。貌似万年不变的恒星与明显瞬息万变的行星形成了对比。行星看起来比恒星大得多，而且它们的大小会随时间而有所变化：它们时而显得更大、更亮，时而小而黯淡。和恒星不同，行星的轨道并不那么简单。它们有时候运动得快，有时候慢。它们有时甚至会在轨道上倒着走，这在当时被称为“逆行”。

对宇宙理性而严肃的解释，最初来自于大名鼎鼎的毕达哥拉斯学派。萨摩斯岛的毕达哥拉斯生活于公元前6世纪，在80多年的生命里，他在同胞中逐渐获得了近乎神圣的地位。他相信数字在描述自然方面拥有永恒而超验的力量。毕达哥拉斯在音乐领域的发现和思索可谓众所周知，最有名的莫过于他在音高、和声与振动中琴弦的长度之间建立了一套简单的数值关系。他认为，音乐可以用数字来解释，其他也不例外。此外，数字所形成的各种模式是万物之本，它们必须在自然界得以呈现，并通过“数的和谐”统治自然。

借助几何学，毕达哥拉斯将他的观点应用于宇宙。他提出，宇宙是基于最完美的几何体之上的——天球。在毕达哥拉斯眼中，地球处于宇宙的中心——它是存在的中心。行星、太阳和月球都嵌在以地球为中心的同心圆盘或圆球上，围绕地球运动。这些天体以不同的速度旋转，形成一个完美和谐、匀速运动的宇宙。事实上，“和谐”这个概念在决定宇宙万物的位置和运动方面扮演着极为重要的角色。每颗行星的轨道都有其自身的音高，这些行星共同组成了“毕达哥拉斯音阶”——这个词依然存在于如今的音乐学中。

毕达哥拉斯的宇宙模型有个主要特点：它采用了一种基本原则，将其作为整个理论体系的基石——就算如今的宇宙学也依然如此。他用一个特别的标准选择了这种基本原则，而且该原则一旦建立，便以人们可以接受的方式描述自然世界。毕达哥拉斯之所以选择圆球作为基本砖



石，是因为它在几何学上是完美的。在他看来，几何学和数学的朴素简单应该贯穿于发现过程的方方面面。毕达哥拉斯的宇宙还基于另一个错误判断：地球是万物的中心，静止不动，永不变化。有这种想法并不奇怪。当时望远镜尚未出现，没有足够的数据来证明地球到底是静止的还是运动的。

在公元前5世纪和4世纪，以地球为中心的宇宙模型由柏拉图发扬光大。柏拉图将毕达哥拉斯的基本原理进一步发展，提出宇宙由许多同心圆球构成，它们一个套着一个，以同样的速度旋转。和毕达哥拉斯不同的是，柏拉图并不试图构建一个量化的宇宙模型。他坚信数学的力量，大力鼓励他的门徒学习几何，不过他自己倒是腾不出什么时间花在自然科学上。柏拉图认为观测到的自然世界是不完美的，这种认知让他更加相信纯理论是构建宇宙模型的唯一方式。根据柏拉图的观点，理论和观测结果的不符都是因为我们没有能力作出准确的测量。我们之所见不过是洞穴中的粗糙影像、真实世界的影子，而这个真实的世界，唯有通过理性和思考才可被真正理解。

亚里士多德进一步发展了地心说。和柏拉图不同的是，他对观测饶有兴趣，但并不试图构建与观测到的恒星和行星运动相符的宇宙学。另外，他热衷于构建一个切实有效的宇宙模型。亚里士多德的宇宙由9个围绕地球旋转的透明同心球构成。最外层是永恒不变的天堂，当中的几层包含各个行星。他的模型和毕达哥拉斯的很是相似，不同点在于亚里士多德想要说明各个球层在运动的同时也相互联系着。他提出了一组嵌套式的透明球层——是它们支撑着可见球层。也就是说，他所描述的宇宙要复杂多了。它总共含有54个嵌套式球层。这样，亚里士多德根据明确的法则，成功构建出一个机械的宇宙。它能再现一些行星的运动，尽管还不是全部。在无法再现的那些情况下，为了摆脱与实际观测结果的不符，柏拉图的观点又可以派上用场了。

希腊人绘制星空图的能力十分有限。他们的观测结果基本都是肉眼所得，因此对于天体的运动也只是一知半解。不过当时已经有足够多的资料来反对毕达哥拉斯、柏拉图和亚里士多德的地心说了。假如球层一直都和谐地围绕地球旋转，那么就不可能观测到行星亮度变暗，更不可能出现时而有之的逆行现象。以地球为中心的模型和真正的宇宙之间存在着根本上的不一致。若要前进，就必须得有改变。改变的方式有两种。

第一种是较为激进的方式，提出者是同样来自萨摩斯岛、生活在公元前3世纪的阿里斯塔克斯。两个世纪之后，他提出了希腊宇宙学所面临的问题的正确答案。阿里斯塔克斯激进地提出，太阳才是宇宙的中心，而不是地球。地球置身于以太阳为中心的球层上。该球层也在匀速运动，和其他行星一样。当地球靠近其他行星时，后者就会显得更大、更亮。也有地球远离其他行星的时候，那么后者看起来就变小了。此外，其他行星和地球相对位置的变化会导致前者看起来像是在逆行一样。阿里斯塔克斯的答案简单得难以置信，然而它却对希腊宇宙学最根本的假设提出了挑战。地球失去了它在宇宙中的特殊地位。

对阿里斯塔克斯观点的反驳主要来自两方，也最终导致了此观点的彻底废弃。其一是基于这个观点本身引发的。反对意见称，假如地球围绕太阳旋转，它得在一年的时间里沿着相当漫长的轨迹前进，所以它的运动速度要相当的快。可如果它是以这般惊人的速度绕行，那么我们在宇宙间飞行的时候势必遭受飓风的袭击。明明感觉脚下踏得很嘛，可阿里斯塔克斯竟然将地球置于如此怪异的运动状态，真是荒唐可笑。第二种反对意见认为，如果地球真是围绕太阳运动，那么——正如我们看到行星会随时间推移变亮变暗——我们不是也应该看到恒星的亮度发生变化吗？另外，如果我们的运动轨迹和太阳相关，而恒星也在球层上绕太阳旋转，那么我们不是应该看见恒星的相对位置会随时间发生变化



吗？如我们所见，希腊人认为恒星在本质上是相对不变的。所以看来这个结论是避免不了的：地球肯定是静止的。

要理解希腊人为什么会有那样的想法，我们不妨做一个简单的练习。看着一张摆有各种物件的桌子。你离桌子很近，闭上右眼，你将会看到所有物件相对位置的二维场景。这时，如果你睁开右眼，闭上左眼，你会看到物件的位置发生了小小的变化。原先一直线上的物件发生了位移。离你眼睛最近的物件，发生的位移越大。现在后退几米，再来做一次这个练习。你会发现物件的相对位置几乎相同，无论你用左眼看还是右眼看。你的观测位置越远，物件相对位置的位移就越小。该效应被称为“立体视觉”，我们之所以能测定周围事物的距离，就是因为它。

只要试想一个更为简单的练习，我们就能更好地理解该效应的原理。在眼前放一支铅笔。现在睁开一只眼睛。然后闭上，换一只眼睁开。铅笔的位置会从一处跳至另一处，相对于背景而言。铅笔离你眼睛越近，跳动的距离就越远，所以我们可以根据铅笔移动了多远推算出与它之间的距离。用这种方式，我们实际上是在测量铅笔角坐标的变化。我们之所以称其为“角”，是因为如果完全不知道与某物之间的距离，我们可以想象它位于一个球面上。这和使用经纬度是类似的，就像我们用角度来给地球表面的某处定位一样。我们要说的是，铅笔的位置越远，我们在空中察觉到的位移就越小——也就是说，角度的变化也越小。

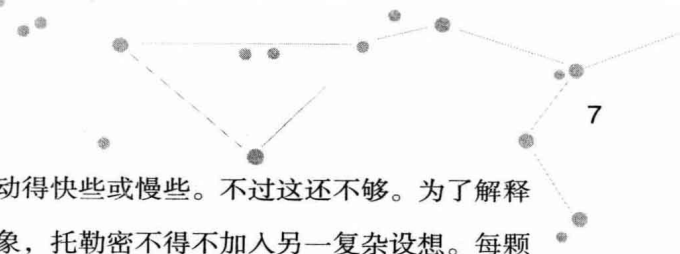
采用与立体视觉相类似的方式测量天文距离的基本原理叫做“视差法”。与立体视觉一样，视差法受到我们测量天空中角坐标能力的限制。如果角度太小，我们就无法识别，或者无法计算得很精确。我们看桌子和铅笔的时候，两个观测点之间的距离显然是不变的。我们双目之间的距离肯定是不变的。我们稍微动动就能避开这个限制。假设我们离桌子的距离保持不变，往旁边挪几步，那么我们看桌子的角度就很不同

了。各物件间的相对位置又发生了变化，而且这种变化要比我们站着不动、交替睁眼闭眼时所看到的大很多。我们挪得越多，桌上物件的位置的角度差异就越大，我们就越容易弄清楚它们的距离。

现在让我们回到对阿里斯塔克斯模型的反对意见上吧。希腊人相信恒星在天空中的位置是铁定不变的。不管在地球上的哪里观察，恒星的相对位置是不变的。这意味着恒星所在的天球必须得足够远，远得让观测点的任何变化都可忽略不计。但希腊人的观测点显然仅限于地球表面——根据地球中心论者的论断，地球是静止不动的——所以也得不出天空一定就非常远的结论。阿里斯塔克斯的主张可大不相同，他认为地球在宇宙中沿一巨大的圆形轨道运动。在一年的不同时间段，地球会处于不同的观测位置。恒星的相对位置会随时间推移发生变化，除非它们所在的天球远得不可思议。在阿里斯塔克斯的宇宙中，恒星离太阳的距离是远得可怕的——比太阳离行星或地球的距离远得多。毕达哥拉斯的宇宙说很简单，于是便传播开来。不必说，阿里斯塔克斯模型的支持者寥寥，人们对其彻底不予理会，都赞成地心说去了。

第二，比较保守的方法是改进地心说模型，因其能够解释数据中的矛盾之处。实际上，由生活在公元2世纪的希腊天文学家托勒密确立的、以地球为中心的宇宙观牢牢持续了一千多年。他构建出一个相当复杂的模型，使得亚里士多德的主张与观测到的行星运动相符。为了让他的模型有效运作，托勒密不得不将柏拉图的原则多少放宽了点。首先，他改变了地球的位置，使其不再准确位于宇宙天球的中央。行星沿着非正圆的轨道运行，看起来时而靠近地球，时而远离地球，呈周期性变化。此外，在他的系统中，各个球层在各自的轨道上并非以相同的速度运动。托勒密提出了另一个点——“对点”，以便根据天球的几何中心反映出地球的相对位置。各个球层以不同的速度旋转，使得行星对于“对点”而言是在作匀速运动。有了这些设想的支持，在地球上观察





时，它们就会在不同时期运动得快些或慢些。不过这还不够。为了解释从地球上看到的行星逆行现象，托勒密不得不加入另一复杂设想。每颗行星都在一个较小的、名为“本轮”的轨道上运行，其中心在相应的球层上围绕地球转动。托勒密的模型对亚里士多德宇宙观中的原始假设稍微作了些变动，就十分准确地符合了行星的运行情况。和阿里斯塔克斯的模型一样，它不得不放弃其中一个假设——匀速运动，不过在其他方面倒是要成功得多。托勒密的代表作《天文学大成》中的图表能在任何时候准确预测行星的位置。

日心说的来临

随着基督教传统的崛起和它对自然现象研究所持的普遍不信任的态度，绘制天空的工作无甚进展。托勒密的宇宙观遵循柏拉图所定下的的大多数规则，而且它确实有效，遂被奉为圭臬。又过了1300年，波兰的神职人员尼古拉·哥白尼才重新注意阿里斯塔克斯以太阳为中心的宇宙观。哥白尼生活在15世纪末、16世纪初，在受托勒密模型影响的基督教教理下长大。然而他却觉得托勒密严重危及柏拉图所倡导的原理，希望重新恢复球体的匀速运动。在一篇名为《小注解》的短文中，哥白尼塑造了他的宇宙模型。

哥白尼的出发点和柏拉图一样，是球体较之其他几何形状有至高无上的地位。他接下来指出，整个宇宙围绕地球而动的说法毫无根据。他提出，我们看见太阳每天东升西落是由于地球自身的转动，而恒星的天空并没有发生变化——这样想才更正常。除此之外，如果地球是沿圆形轨道运行的，那么行星大小会有变化也便有了解释。这简单的假设使托勒密宇宙模型中最复杂的几个方面得到了解决。和阿里斯塔克斯的模型一样，行星逆行的问题也轻而易举就得到了解释。水星和金星只在黄昏或黎明时出现也是很正常的，因为它们围绕太阳运行的轨道比较小。

哥白尼花了三十年的时间构建出他的宇宙模型。比起托勒密以地球为中心的模型，它解释起某些观测结果来要容易许多，而且还回归到了柏拉图所倡导的匀速圆周运动。不过，这个以太阳为中心的新模型也是人为设计的产物。哥白尼为了使他的宇宙学与观测到的行星轨道精确相符，不得不将本轮和偏心轨道的概念引入。哥白尼的宇宙学之所以能在宇宙模型的领域中占有一席之地，是因为他和托勒密一样，在准确预言之前做了全方面的工作。他的名作《天体运行论》结构紧密，阐述清晰，预测准确。不过更重要的是，他构建模型所采用的推论法受到了新柏拉图主义者的大力拥护。他的论证很讲究，而且是基于柏拉图所提出的理论基石之上，同时又将地球从宇宙的中心位置移了出去。

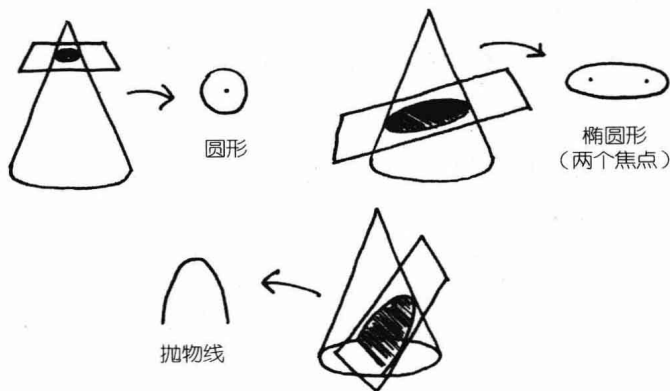
接下来的一个世纪里，哥白尼的模型为一批学者所采纳，在几所大学中教授。不过它总是和托勒密的模型一同被传授。它们并不被视为对真实世界的精确再现，而只是预测方法罢了。事实上，《天体运行论》有一篇简短的前言，称作者所提出的新的宇宙观并非现实，而只是对当时被奉为圭臬的地心说所提出的一种假设。这份免责声明是哥白尼手稿的终审编辑、路德教牧师安德里亚斯·奥西安德写入书中的，他觉得这样做能让如此激进的观点合乎宗教机构的口味。也许这份免责声明真的起到了这样的作用，因为教会没有批判他的学说，只将其视为观点不同。这让后世得以在不需要公然陈述支持或反对的情况下学习哥白尼的思想。

摧毁托勒密模型的重要一步来自一名坚定的地心说支持者的观测结果，他就是天文学家第谷·布拉赫。布拉赫是丹麦贵族，在腓特烈二世的赞助下在汶岛上建了一座功能强大的天文台。二十年里，他在没有使用望远镜的情况下作出了当时最为精确的观测。晚年之时，由于丹麦宫廷的政权变化，他逃往布拉格，在那儿继续精确记录行星的运动。布拉赫中和了托勒密和哥白尼的观点，提出了自己的宇宙学。在布拉赫眼中，地球依然是宇宙的中心，但并非所有的球层都以它为



中心。除了地球和月球，所有的行星都以太阳为中心，而太阳和月球围绕地球旋转。这样，水星和金星总与太阳相依相伴的现象就轻而易举地有了解释，而地球也不失去它的中心地位。布拉赫细致的观测支持了他自己的一些主张。

来自今天德国南部一小镇的数学家兼天文学家约翰尼斯·开普勒在布拉格遇见了布拉赫，帮助其分析观测结果。开普勒是哥白尼的追随者，不过他希望从布拉赫的观测结果中找出各个行星真正的运动规律。开普勒发现柏拉图的另一条原理也保不住了。布拉赫对火星运动的观测极为准确，开普勒借此发现它并非是完美的匀速运动。实际上，火星的轨道略呈椭圆形。所谓“椭圆”，就像是压扁了的圆形——从本质上说，是带有两个中心的圆形，而这两个中心被称为“焦点”。通过两个焦点切分椭圆的直线长于垂直切分椭圆的直线。形成椭圆的另一种方法是：拿一个圆锥体，用一个平面横切。这样形成的截面就是椭圆。横切平面越是倾斜，横轴和竖轴之间的差异就越大；这两轴之间的差异越大，焦点之间的距离就越远。两焦点之间的距离除以二，就叫做离心率。假如离心率为零，就成了一个圆。用与圆锥体底部平行的平面横切，所得到的便是圆形。



圆锥体中的圆形、椭圆形和抛物线

有了布拉赫的数据，开普勒就能详细描述行星的椭圆形轨道了。他的三大定律至今仍在使用。第一定律称，行星沿椭圆形轨道运行，太阳位于其中一个焦点的位置。该定律再次确立了太阳在宇宙中扮演的重要角色。第二定律称，太阳和某特定行星间的假想连线在相同的时间内扫过的面积相等。该定律描述的是行星靠近或远离太阳时的速度。离得越近时，两个天体间的假想连线就越短，因此，为使较短的连线划出与距离较远时大小相等的区域，行星运动的速度也就得越快。换句话说，行星离太阳越近，运动速度就越快。

开普勒的第三定律展示了行星在宇宙间的布局方式，指出任何两颗行星绕日公转周期的平方与椭圆轨道半长轴的立方之比是一个常量。行星越近，它绕一周所需的时间就越短。公转时间和距离之间的精确关系可以用来建立宇宙的法则。换句话说，我们可以精确地计算出行星轨道的大小，比方说以地球的轨道为参照。如果我们确定了地球与太阳间的距离，那我们就能计算出其他所有行星的轨道半径。

当开普勒在构想他的行星运动定律时，意大利天文学家伽利略·伽利雷观测行星的精确度已经更上一层楼。17世纪之初，望远镜在欧洲开始成为一种家喻户晓的光学仪器。1609年左右，伽利略开始用望远镜进行观测，在3年的时间里，他发现了一系列新的天文现象，对其宇宙观的建立有极大影响。伽利略的第一个发现便是月球上的山丘和山谷，这和地球极为相似。当太阳从不同角度照亮月球时，阴影处有着丰富而粗糙的地形，不同于古时所认为的天体是绝对光滑的球体。这离十五世纪才开始的宇宙的民主化进程又迈进了一步。当伽利略将他的望远镜转向木星时，他发现它的周围有几个亮点。它们是新发现的围绕木星旋转的四颗卫星，正如月球是围绕地球旋转的卫星一样。

伽利略支持哥白尼的宇宙模型，在这个方面，他作的最大贡献便是

