

宇宙史话

人类如何认识

宇宙的故事

程
鶚
著

科学原点丛书

清华大学出版社
北 京

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目（CIP）数据

宇宙史话：人类如何认识宇宙的故事 / 程鸷著. — 北京：清华大学出版社，2022.2
（科学原点丛书）

ISBN 978-7-302-56752-3

I. ①字… II. ①程… III. ①宇宙—普及读物 IV. ①P159-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2020）第212109号

责任编辑：胡洪涛 王 华

封面设计：于 芳

责任校对：王淑云

责任印制：曹婉颖

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦A座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者：小森印刷霸州有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：165mm × 235mm 印 张：21 字 数：262千字

版 次：2022年2月第1版 印 次：2022年2月第1次印刷

定 价：79.90元

产品编号：089174-01

前言

40 年前的 1980 年，美国天文学家卡尔·萨根（Carl Sagan）出版了一本面向大众的科普书籍《宇宙》（*Cosmos*）。在为美国公共电视台同期制作的电视片中，萨根站在惊涛拍岸的海边，充满诗意地讲解我们对身边的世界乃至宇宙的认知。他指出：“宇宙就在我们之中。我们是由星星的材料构成。我们是宇宙认识自己的途径。”（The cosmos is within us. We are made of star-stuff. We are a way for the universe to know itself.）

他的书和电视节目在全世界流行，脍炙人口。

在那个年代，宇宙的大爆炸起源已经是科学界的共识。他的读者、观众也对这个名词并不陌生。大爆炸理论不仅描述了宇宙的初始和演化，也精准地解释宇宙中化学元素的来源。它们有的诞生在宇宙之初，有的产生于恒星内部的热核反应，有的则是中子星碰撞的炼狱般压力下的产物。大约 45 亿年前，来自宇宙各个角落、有着不同年龄和经历的原子聚集在一起，形成了地球。再 10 亿年后，它们组合、演化出越来越复杂的生命体，直至人类的出现。

因此，如萨根的叙述，“我们 DNA 中的氮、牙齿中的钙、血液中的铁，我们的苹果派中的碳，都来自恒星的内核”。组成我们身躯的每一个原子都来自那浩瀚的广宇、深邃的远古。宇宙就是这样存在于我们的血肉肌肤之中。我们与宇宙密不可分。

但作为智慧生物的人类并不只是原子的特定组合。人类凭借自主的意识仰望星空。从原始朴素的神灵崇拜到严谨精确的逻辑推理，逐渐地认识宇宙的客观存在，并在这个过程中探索自身的意义。

或者，如萨根所言，那也许正是宇宙在通过我们认识自己。

2016 年 2 月，探测引力波获得成功的新闻轰动全球，将天文学、宇宙学再次推到大众关注的前台。在那波热潮中，我写作了《捕捉引力波背后的故事》，由科学出版社在 2019 年 7 月出版。

然而，引力波故事固然跌宕起伏、引人入胜，它还只是如同引力波本身一样的“涟漪”。在那背后，还有着更多的惊涛骇浪。那便是人类对整个宇宙的认知过程，一个更为波澜壮阔、惊心动魄的故事。

在引力波的故事完成之后，我在 2019 年元旦开始写作这个新故事，以“宇宙膨胀背后的故事”为题在科学网博客页连载，直到 2020 年 4 月底完成。在清华大学出版社胡洪涛编辑和王华编辑的支持下，这个系列现在作为《宇宙史话：人类如何认识宇宙的故事》成书出版。

相比于网络的连载版，本书在内容上保持原貌，只做了少量文字修改。显著不同的是这本书里包括了参考文献，并标明几乎所有内容的来源出处。有心的读者可以按图索骥，做更深一步的探索。

我依据的参考文献基本上都是英文的书籍、论文以及报刊文章等。书中涉及的人物姓名、专业名词以及一些关键性的论文题目、直接引语等以括号或脚注的形式提供了相应的英语表达以供读者参考。它们的原文并不一定都是英语，但为便利起见一概以英语标识。

1930 年，英国剑桥大学物理学家詹姆斯·金斯（James Jeans）出版《神秘的宇宙》（*The Mysterious Universe*），是当时最畅销的普及型科学读物。那时候

没有电视，他的影响力自然不及半个世纪后的萨根。但金斯频频在英国广播公司（BBC）制作科普节目，也曾轰动一时。

金斯描述的宇宙充满了神秘。那时的天文学家还在激烈地辩论宇宙的大小、银河的地位。他们还没有了解到宇宙的膨胀和大爆炸。他们有着太多的没有答案的疑问、无法解释的现象。作为科学家的金斯头脑清醒地指出：天文学所提出的诸多问题，需要从物理学中寻求答案。

当萨根在 1980 年再度面向大众解释宇宙时，他自豪地宣布“在宇宙以及人类在宇宙中的地位问题上，我们已经做出了最令人惊奇而又意想不到的发现”。

这本书所讲述的，就是这一系列发现背后的故事。

在这个进程中，人类经历了远古的神话、古希腊的哲学、文艺复兴的启蒙和现代科学的诞生、技术的飞跃。故事中的角色五彩缤纷，有欧洲的贵族、哈佛的“后宫”、世界大战中的官兵、工业革命的暴发户、天主教牧师……他们的共同之处是与金斯一样，相信破解宇宙之谜的钥匙不在神学、哲学，而在科学、物理学。

这个故事的主角也因此是一代又一代的天文学家、物理学家，包括在宇宙模型上一错再错的爱因斯坦。他们中的一些成为众望所归的名家乃至闻名遐迩的明星。更多的却依然默默无闻甚至被历史忽略、遗忘。但正是他们的青春奉献和不懈努力才有了我们今天对宇宙的认识和理解。

即使是萨根，他在 1980 年时也不知道宇宙的膨胀在加速，不知道在他所描述的浩瀚宇宙之外——抑或之内——还有一个更深邃、更神秘，由暗物质、暗能量组成的未知宇宙。但他与金斯同样清楚地知道，对于宇宙我们还有着太多的疑问，只有持之以恒的科学研究才能逐步找到答案。

书中的故事只能“终止”于 21 世纪初。但书中仍然健在的人物以及他们的

后继者依然面临着众多的未知与神秘。他们在孜孜不倦地寻求着新的发现和一个答案。

就在本书写作期间，诺贝尔物理学奖颇为罕见地连续两年颁发给天文学、宇宙学领域的成果。2019 年获奖者中的皮布尔斯是本书的主要角色之一。2020 年的获奖者中的彭罗斯也在书中有过惊鸿一瞥。

他们的故事，宇宙——我们——的故事都还远远没有结束。

作者

2020 年 12 月 31 日

目 录

第 1 章	爱因斯坦无中生有的宇宙常数	// 1
第 2 章	寻觅宇宙的中心	// 10
第 3 章	坐井观天看银河	// 19
第 4 章	察“颜”观色识星移	// 28
第 5 章	挑战爱因斯坦的宇宙	// 36
第 6 章	“后宫”中丈量宇宙	// 44
第 7 章	20 世纪初的宇宙大辩论	// 55
第 8 章	哈勃打开的宇宙新视界	// 64
第 9 章	一个牧师的宇宙观	// 72
第 10 章	哈勃的“新”发现	// 80
第 11 章	爱因斯坦错在哪里?	// 88
第 12 章	勒梅特的“宇宙蛋”	// 97
第 13 章	宇宙万物始于“伊伦”	// 104
第 14 章	宇宙的年龄	// 114
第 15 章	宇宙大爆炸的余波	// 123
第 16 章	于最细微处见宇宙	// 132
第 17 章	大爆炸之后的困惑	// 140
第 18 章	磁单极之谜	// 149
第 19 章	暴胀的宇宙	// 157



第 20 章	泡泡中的宇宙	// 168
第 21 章	在大尺度上探求宇宙微妙细节	// 177
第 22 章	涡旋星云中的秘密	// 185
第 23 章	揭开宇宙的黑暗一面	// 196
第 24 章	胆小鬼和猛男	// 205
第 25 章	新生宇宙的第一张照片	// 215
第 26 章	爱因斯坦又错了吗？	// 225
第 27 章	宇宙距离阶梯之超新星	// 234
第 28 章	角逐遥远的超新星	// 246
第 29 章	宇宙的膨胀在加速	// 257
第 30 章	称量星系的体重	// 269
第 31 章	神秘可测的浩瀚宇宙	// 279
第 32 章	我思，故我在……这个宇宙	// 289
第 33 章	宇宙之有生于无	// 299
第 34 章	天若有情天亦老	// 309
参考文献		// 319
索引		// 325

1907 年年底，德国的《放射性和电子学年鉴》编辑邀请瑞士专利局的一位“二级技术专家”（technical expert second class）撰写一篇关于相对论的年度综述。

当时 28 岁的阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）刚刚从“三级技术专家”提升到“二级技术专家”，个人生活随着工资的上涨而略有改善。但他对写这篇综述文章显然比对专利局中的本职工作更为上心。

狭义相对论（special theory of relativity）这时已经被发表两年多了，也逐渐被物理学界接受。但爱因斯坦对他自己这个理论的“狭义”始终耿耿于怀。之所以有这个定语，是因为它有着两个明显的缺陷：一是不能与艾萨克·牛顿（Isaac Newton）的万有引力定律和谐，后者的瞬时“超距作用”特性违反相对论中作用力传播速度不能超过光速的限制；二是这个理论只适用于匀速运动的“惯性参照系”，无法应用于有加速度的系统。

就当爱因斯坦坐在专利局里纠结如何综述这两个不足之处时，他脑子里突然冒出个思想火花：如果一个人在空中自由落下，他是感觉不到重力的，即处于“失重”状态。这还不仅仅是他自己的感觉，如果他在下落过程中放开手里的苹果，他也不会看到苹果像牛顿所说的会落下地面，而是会“静止”地停留在他手边。^①

① 当然，在旁观者来看，苹果正在和这个人一起落向地面。

爱因斯坦后来说那是他一辈子所产生的“最快乐的想法”^①，并由此推论出他著名的“电梯思想实验”：一个处于封闭电梯中的人没有办法知道他的失重是因为电梯在坠落，还是电梯其实是浮游于不存在重力的宇宙空间。反过来，如果这个人感受到重力，他也不可能知道那是因为电梯停在地球表面，还是正在没有重力的太空中加速上升。

于是，重力与加速度并没有区别，只是着眼点不同。这样，狭义相对论的两个缺陷其实是同一个，可以同时解决。在狭义相对论中，时间、距离等概念不再绝对，而是“相对”于所在的参照系。在推广的相对论中，重力或万有引力也不再绝对，只是相对于所在的参照系是否加速而存在。

这样，他为年鉴撰写的狭义相对论综述的后面又加上了一节，成为走向“广义相对论”（general theory of relativity）的第一座路标。^{[1]95-103,[2]189-190}



转眼又是好多年过去了。爱因斯坦早已告别专利局，成为正式且越来越著名的物理学家。他对如何推广相对论也有了逐渐清晰的想法：苹果落地、月亮绕地球转等重力现象其实是因为地球的质量让其附近的空间弯曲了，苹果和月亮只是在弯曲的空间中做惯性运动。而且，不只是苹果、月亮这类“物体”，即使是没有质量的光，也会在大质量附近随着空间而弯曲。

但直到1915年，他仍然在寻求一个完整理论的征途上屡败屡战，不得要领。那年夏天，爱因斯坦去哥廷根大学访问讲学，与那里的数学大师戴维·希尔伯特（David Hilbert）切磋。两人都有直觉，广义相对论的数学形式已经几乎触手可及，正等待着那最后的突破。

^① the happiest thought of my life.

回到柏林后，爱因斯坦进入近乎癫狂状态。第一次世界大战已经打响，德国实行战时管制，限量供应生活必需品。偏偏此时，他妻子带着两个儿子离家出走，让他一个人在公寓中自生自灭，吃不上一顿可口的饭菜。他们夫妻为了金钱和孩子不停地在通信中打着笔战。但更让他忧心的是与希尔伯特的信件来往，从对方来信中越来越明显地可以看出希尔伯特有可能抢先发现并发表广义相对论场方程。

为了不失去优先权，爱因斯坦提前安排 11 月在普鲁士科学院举行每周一次的学术讲座，“第一时间”发布他的最新进展。11 月 4 日第一讲开始时，他内心对这个系列的走向其实还十分迷茫。

在讲座之外，爱因斯坦整天除了给夫人、希尔伯特及其他同事朋友写信外，便是埋头演算，一次又一次发现、修正自己推导中的错误。终于在 11 月中旬，他尝试用正在建构中的新公式推导水星公转轨道近日点进动问题时，一举得到了与牛顿力学不同而与实际观测几乎完美符合的数值。

这是他新理论的第一个成功，解决了一个困扰天文学家、物理学家几十年的老问题。已经不那么年轻的爱因斯坦突然兴奋莫名、心慌意乱，竟连续 3 天没能平静。

11 月 25 日，爱因斯坦在普鲁士科学院做了他的系列讲座的最后一讲。留在黑板上的是一个简洁得难以置信的方程，一个统一了惯性参考系和加速运动的广义相对论场方程。

也在这个月，希尔伯特在哥廷根举行了系列讲座，并在 11 月 20 日发布了 he 发现的场方程，比爱因斯坦早了 5 天。但希尔伯特没有试图争取发明权。他说，哥廷根的每个人都会比爱因斯坦更懂得广义相对论中所用的四维时空之数学，但只有爱因斯坦才明白它背后的物理。^{[1]115-118, [2]211-224}（图 1-1）



图 1-1 荷兰布尔哈夫科学博物馆（Museum Boerhaave）东墙上纪念广义相对论的壁画

上面是恒星光线因为太阳质量而弯曲的示意图，下面是广义相对论场方程。方程中的第三项便是爱因斯坦无中生有引进的宇宙常数项（那个“ Λ ”便是宇宙常数）。

【图片来自 Wikimedia: Vysotsky】

爱因斯坦的广义相对论场方程看起来直截了当：左边是描述四维时空“形状”的张量，右边则是时空中质量和能量的分布，中间那个等号将这两个过去毫无关联的元素联系了起来。方程中没有“力”，却能描述水星绕太阳的公转：因为太阳的质量造成它附近空间的弯曲，在这弯曲空间中的水星便自然地绕太阳转起了圈——并且比在牛顿力学中转得更为精确。

后来，美国的物理学家约翰·惠勒（John Wheeler）言简意赅地总结出这个方程的真谛：“时空告诉物体如何运动，物体告诉时空如何弯曲。”^{①[3]235} 二者相辅相成，浑然一体。

① Spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve.



爱因斯坦发表广义相对论之后，不仅在水星公转轨道进动的计算上令人信服，更因为对光线会受太阳影响而弯曲的预测在 1919 年日全食时被英国天文学家亚瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）的观测所证实而轰动世界，一举奠定爱因斯坦在科学史上的地位。

爱因斯坦一发而不可收。十年前，也就是 1905 年他曾石破天惊地连续发表光电效应、布朗运动、狭义相对论、质量能量之等价一系列划时代论文而造就“奇迹年”。随着广义相对论的发现，他在 1915 年后又一次进入创造性高峰。这时他的眼光超越太阳系，投向更广阔的宇宙：既然“物体告诉时空如何弯曲”，那么只要知道宇宙中的星球质量分布，就可以直接推导出整个宇宙的形状。

在 20 世纪初，人类对宇宙的格局只有非常朴素的直觉认识。我们所处的太阳系有一个恒星：太阳。围绕着太阳在不同距离的轨道上运行的有包括水星和地球在内的 8 颗行星^①，多数行星还各自带有数目不同的卫星。

在太阳系之外，我们可以看到满天的繁星。它们虽然看起来铺天盖地，但并不很均匀：大部分星星似乎集中在相对很窄的一条带子上，就像天空中的一道河流。这在中国叫作“银河”，在西方则称为“奶路”（Milky Way）。在这条“河”外面的星星分布明显稀疏。有些地方甚至漆黑一片，似乎没有星星。

而这么多的星星，天文学家对它们的距离、质量只有猜测，所知甚少。

但爱因斯坦不拘泥于这些细节。



有一个流传甚广的笑话，一位牧场主因为牛奶产量问题求教于各方专家。

① 有争议的“第九大行星”冥王星当时尚未被发现。

经过一番仔细的调查、研究之后，一位理论物理学家找出了应对方案。他自信满满地对牧场主说：“首先，我们必须假设奶牛是一个标准的圆球……”^[4]

在遇到未知或无法全面掌握的复杂问题时，将其高度简化、抽象到看起来没有实际意义的简单模型是理论物理学家的拿手好戏。这样研究出来的结果也许无法直接应用，却可以帮助人们理解定性的特质。

爱因斯坦心目中——更确切地说，运算纸上——的宇宙便是这样的一个“球形奶牛”：假设宇宙中的质量是完全理想化的均匀分布，没有哪个地方多一点，也没有哪个地方少一点。让我们来看看新出炉的广义相对论场方程会给出一个什么形状的宇宙。

这个假设虽然听起来匪夷所思，其实并不那么离谱。太阳系看起来结构复杂，但它所有的质量接近 99.9% 集中在太阳这一个点上。与太阳相比，其他的行星、卫星质量完全可以忽略不计，等于不存在。而在太阳系以外，爱因斯坦觉得宇宙可能比我们肉眼所及还要大得多。在那个尺度上，即便把离我们近的恒星都集中在银河也会显得微不足道，遥远的恒星质量分布还是近乎均匀的。

当然，更重要的还是只有这样极端简化了的模型才有可能从广义相对论那数学上颇为复杂的场方程中求出一个解来。而即便如此，爱因斯坦也还是花费了一年的时间，因为他遇到了一个意外的难题。

假设宇宙质量均匀分布之后，整个宇宙的形状便由一个变量决定：密度。爱因斯坦发现他的宇宙不是无限大的，而是有一个由密度决定的大小。但同时因为广义相对论场方程中空间和时间是紧密相连的四维时空，这个宇宙大小不是恒定的，会随时间演变，或者越来越小（坍缩），或者越来越大（膨胀）。无论他怎么折腾，总也找不出一个不随时间变化的、静止的宇宙。

他没有太多地去思考这背后可能隐含的意义，而是认定了这样的解是荒唐

的，不符合物理现实。他发明的广义相对论显然并不完整，遗漏了某个能让宇宙稳定的物理性质。

经过反复地尝试，爱因斯坦终于找到了缺陷：如果在场方程的左边再另加一项，他就可以得出一个静止的宇宙解。

这个新加的项也同样是描述时空形状的张量，但附带着一个新的常数作为系数。因为这个新加的项只在研究宇宙这样的大尺度时才有效果，爱因斯坦把它叫作“宇宙常数”（cosmological constant），用希腊字母 Λ 表示。因为这个新加的项只有在研究宇宙这样的大尺度时才有效果。在太阳系这样的“小”尺度上，这个项因为宇宙常数的数值太小而可以忽略不计。这样，他以前计算所得的水星轨道进动、光线因太阳质量弯曲等结果不受其影响。

1917年2月，他在普鲁士科学院宣讲了这个新成果，并以《基于广义相对论的宇宙学思考》（*Cosmological Considerations in the General Theory of Relativity*）为题在院刊上发表了篇幅10页的论文，正式推出了他的宇宙模型。

爱因斯坦所遭遇的困难其实并不是广义相对论带来的新问题。早在牛顿发现万有引力时也面临了同样的质问：既然所有质量之间都互相吸引，那么它们必然会逐渐趋近，最终全都坍缩到一个点上。牛顿没有什么好办法。他一厢情愿地辩解道，假如宇宙是无限大的，没有哪个点是中心，也就没法坍缩到任何一个点上。或者，在无限大的宇宙中，每个质量都同时受到来自四面八方的吸引力。它们互相抵消因此没有实际效用。^{[5]72-73,[6]5-6,[7]31-32}

这两个论点其实都不成立，因为它们描述的是不稳定系统，无法实际存在。历史上曾有一些物理学家一直试图构造不同模型来解决或者绕开这个问题，均不得要领。事实上，爱因斯坦的论文开篇也是讨论牛顿力学的这个老问题。他指出如果在牛顿的引力场方程中人为地引入一个项，至少可以在数学上避免这

个问题，但在物理上却没有这样做的理由。

他之所以要提出这个可能，便是为了后面在广义相对论场方程中引入几乎雷同的宇宙常数项做铺垫。但即便如此，他也没有能找出在相对论中强加这个附加项的理由。

爱因斯坦相当沮丧。宇宙常数项的引入是完全人为的，破坏了场方程原有的浑然天成之美感。他只能辩解说非如此无法描述我们所在的宇宙，真正是不得已而为之。好在这个项本身没有破坏方程原有的对称性，至少在数学上是可以被允许的。^[8]



爱因斯坦的宇宙模型发表后，引人瞩目的并不是这个只有物理学家才会奇怪的宇宙常数，而是他所描述的宇宙的形状：一个有一定大小的圆球，其半径由宇宙的质量密度决定。但它又不是我们日常生活中所熟悉的球。爱因斯坦认为，虽然宇宙的大小有限，却没有边界。

宇宙中的质量“告诉”了空间需要弯曲。因为质量均匀分布，宇宙中所有的地方都有着相同的弯曲度。就像一条纸带弯起来首尾相连构成一个环，这个宇宙便弯成了一个标准的圆球——恰如理论物理学家心目中的“奶牛”。

他说，如果我们能往天上某一个方向打出一道有足够能量的光束，^① 这束光在若干亿年后会从相反方向回到地球，就像费迪南·麦哲伦（Ferdinand Magellan）的船队完成环球航行后胜利地回到出发的港口一样。

麦哲伦的船队只能在地球表面的海面上航行。他们用3年时间绕地球一圈回到了原地，说明地球表面是一个大小有限而又没有边界的世界。这是三维的

① 那个时代还没有激光的概念。

地球在其表面这个二维世界的一个投射。

爱因斯坦解释说，我们所生存的宇宙圆球其实是其在四维空间中的形状在人类所能感知的三维空间的一个投射。生活在三维空间中的人类无法看到四维宇宙真正的形状，只能感知这么一个有限无边的圆球投射。

这个匪夷所思的图像不仅让一般人摸不着头脑，即使是物理学家、天文学家也对其将信将疑，姑且称之为“爱因斯坦的宇宙”（Einstein universe）。

在人类仰望星空几千年，对满天繁星发出过无数的猜想、感慨之后，爱因斯坦是第一个基于物理学原理为整个宇宙构造模型的人。因此他的这篇论文标志了现代宇宙学的诞生。

只是，宇宙究竟有多大、是否有限、是否有边界、是静止还是演变，甚至……真的只有一个宇宙吗？在爱因斯坦所处的时代，这些问题不仅没有答案，而且无从把握。爱因斯坦的“奶牛”宇宙和他那无中生有的“宇宙常数”只是一个起点，为后续的几代人审视宇宙指出了方向。

第 2 章

寻觅宇宙的中心

爱因斯坦的宇宙有限无边、处处对称。其中每一个空间点都与其他任何点等价——宇宙没有中心。

在他之前 200 多年，牛顿在辩解宇宙不会因为万有引力而坍缩时就说过宇宙可以是无限的，没有任何中心能作为坍缩的终点。他们的出发点完全不同，却都自然而然地假设宇宙不存在一个中心。虽然他们的说法都经历了严格的科学质疑，但至少两人都没有因此遭遇来自科学之外的诘难。

比牛顿再早不过几十年、上百年的伽利略·伽利雷（Galileo Galilei）、尼古拉斯·哥白尼（Nicolaus Copernicus）等人却没那么幸运。他们曾仅仅因为质疑了地球是否是宇宙的中心便触犯了当时社会主流的条规。因为在那个年代，宇宙的中心不仅是一个事实判断，更是神学、哲学之信仰。



虽然直到今天还有人顽固地信奉“地平说”，认为地球不是一个球体而是非常宽广的平地，人类其实很早就领悟到地球不是平的这一事实。古希腊人观察到，迎接回港船只时总是先看到来船的桅杆然后才能看到船身；航海的船员知道越往北走北极星在天空的位置会越高，等等。

至迟在公元前 350 年，亚里士多德（Aristotle）在《论天》（*On the Heavens*）

中已经指出月食是因为地球挡住了太阳投向月亮的光——而不是什么“天狗吃月”。所以，月食时月亮上那个黑影正是地球的投影，是圆的。在人造卫星、宇航员能够直接观看自己家园的 2000 多年前，人类其实已经用月亮做镜子看到了地球的形状。

亚里士多德之后不久，埃拉托色尼（Eratosthenes）更是利用夏至日正午太阳投影在两个不同纬度的城市中的差别测量了地球的大小。他发现地球的周长是那两个城市之间距离的 50 倍——现代测量的结果是 47.9 倍。^{[9]63-76}

与地球是圆的类似，也有不少证据表明地球是静止不动的：在地球上生活着的人安之若素，从来没有晕车、晕船那种处于运动环境的反应；我们在地面上跳起或者往天上高高地抛出皮球，都会直上直下地落在原地，地面没有在腾空时移动；如果没有风吹，空中飘浮着的云彩纹丝不动，不会自己渐渐落后……

因此，古希腊的先贤们认识到人类所处的是一个静止不动的圆球，被满天的繁星笼罩着，星星们绕着地球步调一致地缓慢转动，即中国人所称的“斗转星移”。为了辨识位置，他们把比较显眼的星星们就近组合成为“星座”，根据它们的形状加以想象赋予各种形象的名称。

在这个星空背景上，还有太阳、月亮以及几个肉眼可见的星星没有固定的位置，而是在一些特定的星座（即所谓“黄道十二宫”）中游走。这些“行走的星”因此被称作行星。这些行星不断变迁的位置可通过其所在的背景星座粗略地记录。

因为地球是圆的并有着一定的大小，在地球表面不同地方或者在同一地方但不同时间看这些行星，它们背后的星座位置会略有差异。这是因为观察者角度不同，与行星位置的视线会延伸到星空背景的不同方位。这个现象叫作“视差”（parallax）。通过简单的几何关系知道，被观察的星星离我们越近，所看到的视

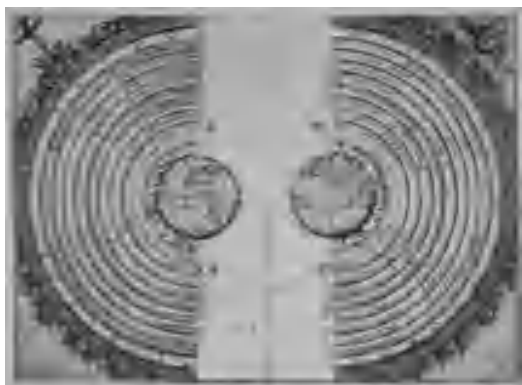


图 2-1 16 世纪葡萄牙人巴尔托洛梅乌·维利乌 (Bartolomeu Velho) 绘制的托勒密宇宙模型

地球处于中心，往外在圆形轨道上依次是月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星、固定恒星的天球。最外面是“天堂帝国，上帝之所在”。图上还标识着每层轨道和地心的距离以及它们的旋转周期。

差会越大。如果知道地球的大小，就可以通过视差角度计算那几个行星离我们的距离。

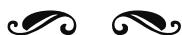
从亚里士多德到公元 2 世纪的克罗狄斯·托勒密 (Claudius Ptolemaeus)，希腊先贤根据这些观察和经验积累，逐渐构造出一个相当具体的宇宙模型：静止不动的地球处于宇宙的中心。行星在地球外面不同距离的圆形球壳上，由近及远依次为月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星。再外则是一个非常大的圆球，上面镶嵌了所有那些不自己游走的星星，即恒星。(图 2-1)

这个恒星球壳便是宇宙的边界。在它之外也不是虚空，而是人类不可能接触的另一个世界：上帝以及诸神之所在。上帝推动着恒星所在的大圆球，令其每昼夜绕地球转动一周。大圆球还依次带动其他圆球各自转动，那就是我们看到的行星的“行走”。

亚里士多德、托勒密的宇宙模型简单明了、通俗易懂。模型中为上帝预留的空间和人类占据宇宙中心的位置也符合上帝造人的逻辑。因此得到人们广泛的接受。

这个模型却有着一大缺陷。即使在没有精确测量的年代，它所描述的行星位置和走向也经常与实际观测不符。托勒密不得不持续加上一系列“均轮” (deferent)、 “本轮” (epicycle)，又外加“偏心” (eccentric)、 “载轮” (equant)

的数学手段进行修正——或者说拼凑。于是，如同“球形奶牛”突然各处长出好多犄角，原本简洁的模型迅速异化成繁复混乱的大杂烩。^{[9]77-100}



古欧洲的科学、人文在托勒密时代登峰造极，其后却随着中世纪的到来被他们的后代丢弃、遗忘，直到 1000 多年后的文艺复兴时期才从阿拉伯人保存的译本中重新发现这个宝藏。在那漫长的十几个世纪里，伊斯兰科学家做出过一些改进，但托勒密的宇宙模型依然保持着原样。

当 16 世纪的波兰人哥白尼重新研究托勒密繁复的修正过程时，他很快发现如果改动一下，把行星绕静止的地球运动改为太阳不动，其他行星（包括地球）绕太阳运动，可以大大简化所需要的计算。他指出这样还可以很简单地解释为什么水星和金星总是伴随着太阳：它们处在离太阳最近的圆球上，从外面圆球上的地球往里看，它们会总是在一起。

哥白尼自己没有观测过行星的位置，也没有新的数据。他只是用托勒密原有的数据，从数学上说明以太阳为中心的计算手段有明显的优势。当然，他也明白从一个静止且处于宇宙中心的地球，转换成以太阳为中心并将上帝为人类特制的地球作为只是众多绕太阳转的行星之一，这会是一个非同小可的思想转变。虽然有当时教皇的鼓励，但他对公开发表这个理论依然迟疑不决。他的著作直到他死后才问世。^{[9]147-158}

哥白尼的这个简单数学变换果然引发了“地心说”与“日心说”旷日持久的争执。但他不可能知道，这还标志了一场科学革命的到来。



托勒密的宇宙模型预言 1560 年 8 月时，月球会跑到太阳的前面挡住后者的光，那次的日食果然发生了。当时才 13 岁的第谷·布拉赫（Tycho Brahe）一方面

对如此异常的天象和它的可被预测惊异无比；另一方面对预测的日期与实际差了一天而耿耿于怀。他迷上了天文学，后来发明了可以精确测量星星高度的六分仪（sextant）。

1572 年，他在仙后星座（Cassiopeia）发现了一颗以往没见过的星。他跟踪了几个月，没有发现像月亮那样的视差。因此他断定这颗新出现、后来又消失了的星比月亮远得多，应该处于最外围的恒星球。

然而，亚里士多德曾经信誓旦旦地说月亮所在的天球之外是永恒不变的，不可能突然冒出以前没有的星星来。年轻的第谷用实际的证据推翻了经典。他所观察到的是一次“超新星”（supernova）爆发。

丹麦国王因此赐给他一座小岛和资金修建一个专业天文台。第谷在那里发明、建造了一系列可以精准测量星星位置的大型六分仪、象限仪（quadrant）等

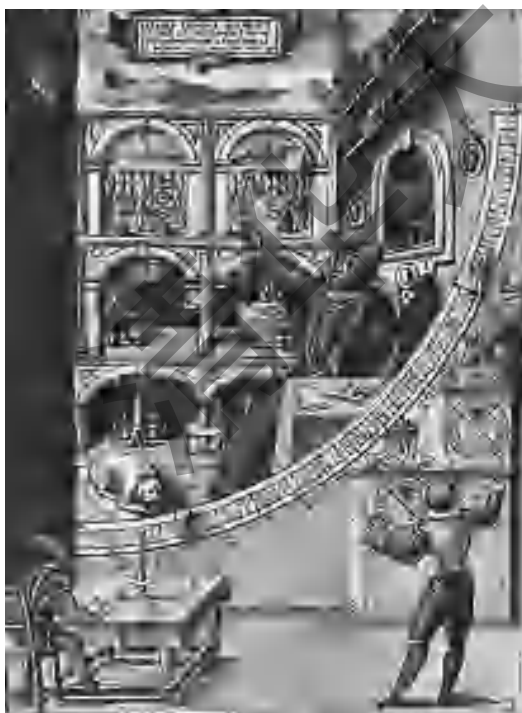


图 2-2 第谷使用他自制的大型墙式象限仪测量星星位置情形的绘图

仪器，开创了精确记录行星数据的先河。他还通过测量彗星的位置变化证明这些太阳系的不速之客也是来自远方，还由远而近地“穿透”了诸行星所在的那一层层球壳，证明亚里士多德所说的实体球并不存在。（图 2-2）

1601 年，第谷在 54 岁时“英年早逝”。他的死因是科学史上的一个谜，以至于迟至 2010 年他的遗体还被挖掘出来以现代技术分析是否死于谋杀。^{[9]156-161,[10]56}

对他的同时代人来说，更值得挖掘的是他遗留下来的海量天文数据。第谷自己

坚持“地心说”，也构造过复杂的太阳系模型，试图诠释这些数据。但他的数据比他的理论更富有说服力。因为它们具备前所未有的精确度，迫使人们不得不正视无论是托勒密还是哥白尼的模型都无法与数据吻合这一事实。他的继任者约翰尼斯·开普勒（Johannes Kepler）只好另辟蹊径。

在各种各样的尝试失败后，开普勒终于领悟到第谷的数据说明行星所走的路径是椭圆，而不是亚里士多德、托勒密到哥白尼、第谷都一致坚持的圆形。他们之所以对标准的圆形情有独钟，除了来自数学、哲学乃至宗教思维上的对称、唯美倾向之外，也是出于现实的考虑：没有什么实在的东西可以转出一个不圆的形状。行星可能不依赖任何实体、“漂浮”在虚渺的空间里沿着抽象的“轨道”运动，这还不是他们所能想象的概念。

开普勒自然也无法解释、理解这其中的原理。但他发现采取椭圆轨道后，其他种种困难都可以迎刃而解。他陆续总结出后来以他的名字命名的“行星轨道三定律”，揭开了整个太阳系的运动规律。^{[9]165-172}



第谷去世3年后，一颗更为明亮的超新星在1604年出现在蛇夫座（ophiuchus），持续3个星期在白天都能看得很清楚^①。开普勒和伽利略都对它进行了长期的观测。伽利略当时在意大利帕多瓦大学担任数学教授，因为讲授新星的出现，表明了亚里士多德体系的错误，从而与本校的几个哲学教授结下了梁子。但他更大的麻烦还在后面。

早在托勒密时代，人们就知道一定形状的透明晶体、玻璃可以用来制作放大镜、老花眼镜。但直到17世纪初，才有荷兰人想起将两个镜片用圆筒一前一

① 在那之后，要等到1987年才能再看到类似的超新星。

后连接起来，可以观看很远的物体。伽利略在 1609 年听说后，立刻就自己琢磨着制作出了望远镜^①。他把这个对航海价值无比的新发明捐献给当时的威尼斯共和国，因此赢得终身教职，工资也翻了三番。但更重要的是，他同时也把自制的望远镜指向了夜晚的星空。



图 2-3 伽利略描述他看到木星卫星的笔记

这一看不打紧，用现代的话说就是“三观尽毁”。

首先，他看到月亮的表面坑坑洼洼，完全不是亚里士多德所想象的那种光滑圆润、完美无缺的天体。进而，他发现木星附近还有小星星，从它们不断变化的位置可以推断它们是在环绕着木星转圈。也就是木星有卫星；不是所有星星都在绕地球这个中心转。后来，他又看到了金星像月亮一样有圆缺盈亏，其变化幅度无法与托勒密的地心模型合拍，但可以用哥白尼的日心模型解释。（图 2-3）

伽利略不计前嫌，邀请他的老对手来亲眼查看这些奇观，却均遭拒绝。哲学教授们对自己既有的世界观更为珍惜，纷纷做了“鸵鸟”。科学家则不一样。开普勒收到伽利略送来的望远镜后，很快就证实了伽利略的发现。他还自己设计出不同结构的望远镜来。

随着伽利略支持“日心说”的态度越来越明朗、拥有的证据越来越坚实，他与维护“地心说”的哲学家、神学家的关系也越来越紧张。1633 年，他在教

^① 当时叫作“间谍镜”（spyglass）。

会面前被迫认错，被判终身软禁。传说他在离开裁判所时，依然嘟囔了一句“可它（地球）的确是在动。”^①

迟至 1979 年，教皇保罗二世（John Paul II）才正式为伽利略“平反”。^{[9]172-188}



没有证据表明伽利略曾经在比萨斜塔上投下过不同质量的球做演示。但他的确在比萨大学任职时开创了系统、精确运动学——或科学——实验的先河，并用数据否定了亚里士多德质量与速度关系的谬误。因此，伽利略普遍被认为是物理学——甚至现代科学——的开山鼻祖。

开普勒的行星定律和伽利略的运动学实验成果后来在牛顿手中得以集大成，以牛顿动力学三定律和万有引力定律奠定了经典物理学牢固的根基。太阳成为新的中心，行星——包括地球——因为太阳的引力而围绕太阳在椭圆轨道上运动成为新的科学真理。^②而当牛顿展望整个宇宙，猜测不存在什么中心时，也没有人再去追究他的离经叛道。

伽利略通过他的望远镜还看到了一个人类从来没有见识过的世界：更多更多——“几乎不可思议之多”^③——的肉眼无法看见的星星。宇宙比当时任何人想象的还要更大、更丰富。而他的望远镜为人类认识、探索宇宙打开了一个崭新的窗口。

1672 年，伽利略逝世 30 年后，法国戏剧家莫里哀（Moliere）公演了喜剧《女学究》（*The Learned Ladies*）。剧中男主角对他的妻子、妹妹和大女儿都不思女红、家务，一味追求科学牢骚满腹。他的抱怨之一是她们在自家楼上安装了一架

① But it does move.

② 牛顿引进的“惯性”概念也解决了地球上的人感觉不到地球在运动中这个难题。

③ an almost inconceivable crowd.

望远镜，要看月亮上在发生什么！^{[11]6}

的确，在那个年代，拥有和使用望远镜进行天文观察，已经成为欧洲上层人物，甚至并不富裕的中产阶级附庸风雅的重要标志。他们所拥有的，也已经不是伽利略拿在手上的简单直筒，而是占据整个房间，甚至是需要专门修建天文馆式建筑才能容纳的大家伙。

自然，他们所观看的，也不只是月亮上的变化。人们的视野正投向更高更远，逐渐超越太阳系、银河系，直至宇宙的广袤深处。

开普勒和牛顿从根本上颠覆了亚里士多德、托勒密以地球为中心的宇宙模型，重新构建了太阳系。太阳和月亮并不是行星：前者是不动的恒星；后者只是地球的一个卫星，也是唯一真的绕地球转的天体。地球则成为行星之一，与原来已经认定的金木水火土五大行星一样在绕太阳的椭圆轨道上运行。

正如伽利略那不服气地嘟囔：地球在动。它不仅绕着太阳公转，而且还以 24 小时为周期自转，这样就很简单地解释了人类观察到的满天繁星步调一致的斗转星移。于是，亚里士多德精心设计的那个最外层、镶嵌着所有恒星转动着的大轮子也就失去了意义：恒星是恒定不动的，是地球在动。

只是，“皮之不存，毛将焉附？”没有了那个天球做依托，漫天的恒星如何在太空漂浮、分布？牛顿力学只能计算太阳系内诸星体的运动。外面的星星离得太远，没有引力的关联。唯一的联系是我们能被动地接收到它们传来的光。要认识这个宇宙，人类依然只能依靠最原始的手段：观察、思考。

比如，夜空中为什么会有一条明亮的星河？



在希腊神话故事里（图 3-1），众神之王宙斯（Zeus）偷偷让他的私生子、后来的大力神赫拉克勒斯（Heracles）吮吸他妻子、女神赫拉（Hera）的奶。赫



图 3-1 16 世纪意大利画家丁托列托（Tintoretto）根据希腊神话创作的油画《银河的起源》（*The Origin of the Milky Way*）

拉惊醒后把孩子推开，致使乳汁喷洒而出，化为中国人称作银河的“奶路”。^①

现实地看，银河是一条横贯夜空的窄带，在伽利略的望远镜里呈现出很多的星星。这条河流似乎还继续延伸下去，环绕着地球。

1750 年，英国的托马斯·赖特（Thomas Wright）出版了《宇宙的原始理论或新假设》（*Original Theory or New Hypothesis of the Universe*），提出一个新的宇宙模型。（图 3-2）

他把托勒密的模型整个脱胎换骨：宇宙就是一个相对来说很薄的球壳，所有星星包括太阳系都挤在这个球壳之中。因为球壳半径非常大，太阳系所在的局部差不多就是直直的扁平盒子。地球随着太阳系在盒子中间。如果顺着球壳的方向看，那里会有密密麻麻的群星，便是我们所见的银河；如果转往其他方向，能看到的星星便会稀落得多。^{[7]16,[11]31-33}

① 这个传说有着几个不同的版本。

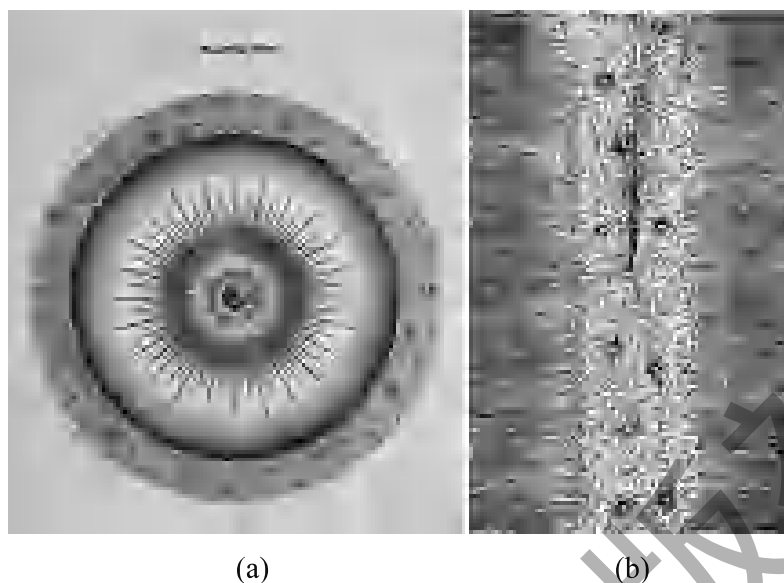


图 3-2 赖特绘制的“球壳宇宙”模型

(a) 全景图，所有星星都在一个球壳里，球心是“上帝之眼”；(b) 太阳系附近的球壳放大示意图。地球处于这一段的中心，顺着球壳方向看到的星星密集，便是银河。

赖特当然不可能想到 160 年后会有一个名叫爱因斯坦的人出来说宇宙是“有限无边”，但他的模型几乎就是爱因斯坦用来做类比的那个二维世界：如果能顺着球壳在星星中穿梭，就会发现一个有限无边的宇宙。

这个模型还让赖特为上帝找到一个比亚里士多德所设计得更好的家：球壳宇宙之外的球心点。上帝已经不再需要通过大轮子推动这个世界运转，他只需占据中心位置，通过那里的“上帝之眼”（eye of providence）督查、掌控整个宇宙的命运。

赖特的理论传到欧洲大陆时已经走样了，但引起了一个刚刚 30 岁出头的德国青年的注意。伊曼努尔·康德（Immanuel Kant）那时候正在研习牛顿理论和物理世界。他在 1755 年出版了一本名为《自然通史和天体理论》（*Universal Natural History and Theory of the Heavens*）的小册子阐述自己的宇宙观。他认为

赖特将神学与物理学结合到一起纯粹是画蛇添足：宇宙的结构应该可以完全遵循牛顿力学，不需要上帝的存在。

他也没觉得需要那么一个有限无边的球壳。

受赖特模型的启发，康德心目中的银河就是一个延长了无数倍的太阳系：一个里面装着很多星星的大铁饼式的圆盘。就像众行星在同一平面上绕着太阳转一样，这个圆盘也在旋转。与赖特相似，他设想这个盘子面积非常大，但只有一定厚度。我们的太阳系在盘子中心，因此我们看到的夜空有着一道明亮的银河，那就是盘子的边缘方向。^{[7]18, [12]40-41}



赖特和康德只是在大胆假设，天文学家却需要小心求证。

在伽利略之后，越来越强大的天文望远镜一代又一代地出现。与赖特同时代的英国天文学家威廉·赫歇尔（William Herschel）拥有着当时世界上最大的望远镜，而且还都是他自己亲手制作的。

赫歇尔出生于德国的一个音乐世家，自己原本也是音乐家。他在 34 岁时读到一本天文教材后走火入魔，随即荒废了音乐，全身心投入打磨望远镜镜片和看星星中。他甚至连吃饭时都不愿意耽误工作，边干活边让妹妹给他喂食物^①。

功夫不负有心人，赫歇尔在 1781 年用自制的望远镜发现了天王星，名声大噪。同时他也赢得一份国王亲赐的终身俸禄，可以专心磨制更大的望远镜，看更多的星星。

为了看清宇宙的形状，赫歇尔采取了最质朴的笨方法：数星星。夜复一夜，

① 他妹妹卡罗尔·赫歇尔（Carlone Herschel）后来终身未嫁，全心全意为哥哥担任助手，自己也颇有成就。