

数学名著译丛

最佳可能的世界 ——数学与命运

〔法〕Ivar Ekeland 著

冯国莘 张端智 译

龙以明 校



科学出版社

数学名著译丛

最佳可能的世界 ——数学与命运

〔法〕Ivar Ekeland 著

冯国苹 张端智 译

龙以明 校

科学出版社

北京

图字：01-2012-1837

内 容 简 介

乐观主义者认为当今世界是最佳可能的世界，悲观主义者却认为未必尽然。但什么是最佳可能的世界呢？我们怎样定义它呢？是那个以最有效的方式运转的世界吗？还是那个生活于其中的大多数人感到舒适和满足的世界？在17世纪和18世纪之间的某个时间，科学家们感到他们可以回答这个问题了。

这本书就是关于他们的故事。伊瓦尔·埃克朗带领读者踏上了一个用科学方法展望最佳可能世界的旅程。他从法国数学家莫培督开始，莫培督的最小作用量原理断言自然界中的万物以需要最小作用量的方式发生。埃克朗说明这一思想是科学上的一个关键突破，因为这是对最优化概念或最有效和最起作用系统的设计的第一次表述，尽管后来最小作用量原理被细化并作了很大修改，但是从中产生的最优化概念几乎触及到今天的每一门科学学科。

沿着最优化的深刻影响以及它影响数学、生物学、经济学甚至政治学研究的出人意料的方式，埃克朗从头到尾展示了最优化思想是如何推动我们最大的智力突破的。其结果是一个迷人的故事——一个科普爱好者和科学史学家必不可少的读物。

Originally published in French as *Le meilleur des mondes possibles: Mathématiques et destinée* © Editions du Seuil, 2000.

图书在版编目(CIP)数据

最佳可能的世界：数学与命运/（法）埃克朗（Ekeland, I.）著；冯国苹，张端智译，龙以明校。—北京：科学出版社，2012

（数学名著译丛）

ISBN 978-7-03-034830-2

I. ①最… II. ①埃… ②冯… ③张… ④龙… III. ①数学-普及读物
IV. ①O1-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第131076号

责任编辑：陈玉琢 / 责任校对：朱光兰

责任印制：钱玉芬 / 封面设计：王浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

竣工印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年6月第一版 开本：B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张：9 3/4

字数：185 000

定价：39.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

《最佳可能的世界》中文版序

2008年我到不列颠哥伦比亚大学的太平洋数学研究所访问时，Ivar Ekeland 教授把他刚出版时间不久的英文版《最佳可能的世界》送给我。此书的书名和精彩的内容立刻引起了我的极大兴趣。

我与 Ivar 结识多年。他是国际著名数学家和经济学家。曾在法国巴黎第九大学任职多年。2003 年到加拿大任数理经济学首席教授和太平洋数学研究所所长。他是加拿大皇家学会会员、挪威、奥地利等国科学院院士和外籍院士。他在凸分析、最优化、非线性分析、辛几何等方面做出了许多开创性的工作、成就卓著。他在经济学领域也有很多重要成果。他 1984 年创办的法国《Poincaré 研究所年刊 - 非线性分析》杂志在非线性分析领域产生了重要影响。由于其突出贡献，他应邀在 1978 年国际数学家大会做特邀报告，获得了法国科学院 Paul Langevin 奖、法国科学作家协会 Jean Rostand 奖、法国数学协会 Armand Lebesgue 奖、比利时科学院大奖和多个大学的名誉博士学位等荣誉和奖励。他在国际数学界和经济学界享有很高声誉。

Ivar 特别关注与中国学术界的交流合作。曾多次到南开大学、北京大学等校访问讲学、合作研究。20 世纪 80 年代 Ivar 曾投身于哈密顿系统的周期轨道研究，引进了后来以他的名字命名的指标理论，特别对给定能量的周期轨道的多重性与稳定性等问题的研究做出了重要贡献。2002 年他得知我与人合作的工作推进了这一领域的研究，专门来信风趣地祝贺“在地球的另一面所获得的令人惊喜的成果”。近年来他多次参加我在陈省身数学所组织的“变分方法国际会议”的学术委员会、推荐优秀数学家做报告，为此会议多次成功举办做出了重要贡献。2010 年他又和我们一起参与组织在陈省身数学所举办的三周数理经济研究生暑期学校，亲自为研究生讲课，鼓励青年人从事数理经济学的研究。

Ivar 十分热心于科学普及工作，写了许多通俗易懂的科普文章和书籍，包括《计算出人意料：从开普勒到托姆的时间图景》、《数字世界中的猫》等优秀的科普著作。《最佳可能的世界》是他的又一部科普力作。在此书中他从我们当今的世界在所有可能的世界中是否是最佳的这样一个吸引人的话题出发，深入浅出地介绍了几百年来科学家们对于客观世界的探索和认知发展历程以及他们的重要的创新贡献与深刻的思想理论，特别是包含了 Ivar 本人对这些发展的细致分析与深入思考。全书内容丰富、深入浅出、引人入胜，是一本不可多得的优秀科普著作。

在这里我衷心感谢 Ivar Ekeland 教授欣然为此书中文版专门撰写精彩序言和他对中文版出版给予的关心和支持；感谢冯国苹和张端智同志为此书翻译所做的大量工作；感谢科学出版社的鼎力资助和支持、特别是陈玉琢编辑对中文译稿的精心雕琢和提出的许多中肯意见。相信此书中文版的出版将会为我国广大读者了解科学发展历程，理解科学和科学家的作用，吸引青年学子投身科学技术事业，促进我国科技知识的普及和科技事业的发展起到积极的作用。

龙以明

2012年5月于南开园

为中文版所写的序言

现代科学的诞生用了不足百年的时间。1610年伽利略在意大利出版了《星空信使》的天文学著作，书中记录了他将新发明的望远镜伸向夜空所作的观测：他宣称木星有若干个卫星，土星具有奇怪的形状（他的工具不能足够精确到区分光环），月球上有山脉，银河由许许多多肉眼看不见的星体组成。1687年牛顿在英格兰出版了《自然哲学的数学原理》，其中他证明了行星的运动是万有引力定律的数学推论，即质量分别为 m 和 M 且相距 d 的两个物体以与 mM/d^2 成正比例的力互相吸引。在这段跨度不到八十年（相当于一个人的一生）的时间内，费马、笛卡儿、惠更斯、莱布尼茨以及许多不像他们那样著名的贡献者奠定了现代数学和物理学的基础。他们发现自然界遵循简单的定律，这些定律可以由可测量的量之间的数学关系来表达，正如万有引力定律将吸引力用质量与距离来表达一样。用伽利略的话来说，自然界的语言是数学，直到今天这仍是正确的。

这个非凡年代的另一个特征是科技的发展。我们已经提到伽利略的望远镜，它已经永远地改变了我们遥望夜空和银河的方式。但这也是一个钟表被发明的时代，从而小时和分钟能够被度量，时间能够被等分。这也是一个武器被完善的时代，其中显著的是火器和大炮。比如伽利略关于自由落体的著名工作主要是关于弹道学的研究，这可以用来确定子弹或炮弹的轨道。我们的现代世界源于这些发现：我们知道天空不是一个延伸出地球的着色的圆形屋顶而是一个拥有无限遥远星体和星系的无限大的空间，我们用伽利略可能已经认知的钟表来安排我们的工作，我们生活在我们不断投入大量努力和费用来加以完善的难以置信的强大武器的威胁之中。

显然，科学的产生和科技的发展将带来显著的政治变化。确实，17世纪以来，欧洲的政治形势发生了巨大的变化：17世纪我们有由强大的贵族和大量贫困农民组成的绝对权威的统治，如今我们有由大量城市中产阶级和由选举产生的政府组成的民主体制。这个改变不是立刻就出现的。事实上，当时的统治者正是担心这些新发明最终会挑战他们的权威，因此这些先驱们不得不经常向他们保证，恰恰相反，这些发展不是对老的秩序的挑战而是支持。在他们所有的著作中，他们不得不顾及政治形势：他们不得不说明他们正在研究的科学是基督教的科学，甚至是君主制主义的科学，正如某些前苏联的科学家们不得不为他们的成果贴上政治标签一样。

17世纪欧洲的政治是由宗教控制的。在天主教统治的国家，比如意大利和法

国，这正是伽利略和笛卡儿生活的国家，教会是极其强大的，强大到以至于尽管小心谨慎，在伽利略生命的最后岁月仍被宣判有罪而被囚禁起来，而笛卡儿则不得不在荷兰和瑞典这样的新教国家进度过了他大部分的工作生涯。其中部分原因是他们个人的安危所致，但也部分由于他们所受的教育，这种教育和由之产生的信仰使得天才遵从天主教教义，他们不得不使他们的科学发现调和于他们的宗教信仰。在某种程度上，他们的境况与今天美国的正统派基督教徒很相似，这些人想使他们的上帝在几千年前创造世界的信仰与那些证明地球与生命已经存在几十亿年的化石记录和地质学证明相协调。

这产生了一个特别针对基督教的问题：如果全能的上帝创造了世界，并且正如教义所声称的，他爱人类，那么为什么对大多数人来说生活会是肮脏的、粗野的、短暂的？对于上帝的能力和仁爱之心来说，人类拥有更好的生活，至少是好人生活舒适，邪恶的人生悲惨，生活的好坏和他们的行为成比例难道不是更适当吗？随着科学在17世纪的出现，一个非常原创性的答案开始形成。也许上帝本人受制于自然法则，所以某些事情是不可能发生的：在离开我出发的地方前我不可能到达某地，除非碰到其他物体落体不可能停止。所以我们生活在“最佳可能的世界”中。在所有与自然法则相一致的世界中，上帝创造了最好的一个，即那个人类得到最好境遇的世界，这并不意味着他们全体的境遇好，而只是在所有其他可能的世界中，他们的境遇会更差。

自从17世纪以来，新科学，即生物学和经济学出现了，它们在塑造现代社会方面比物理学变得甚至更有影响力。它们最初都经历过行为的背后一定隐藏着目的的幻觉，即对人类的产生与至高无上的认识。我们就像总是寻求父母支持的孩子。像孩子一样，我们必须学会成长和保护自己。宇宙中不存在所谓隐蔽的力量，当我们做了某些鲁莽事情时可以出来挽救我们。如果我们使地球不可居住，没有我们可以迁移去的其他星球。我们是地球飞船的飞行团队，当飞船或者我们自己处于危险境地时不存在所谓的自动驾驶员会来拯救我们。如果我们想继续安全地航行并面对挑战或面对我们的时代、气候变化、人口增长、资源匮乏，而不经历巨大的自然或社会灾难，我们必须发展某种全球管理机制。教育年轻的一代将是发展全球公民意识的关键。科学是万有的，它揭示了所有人是平等的。科学也给了我们理解全球问题的方法并且将帮助我们解决这些问题。

Ivar Ekeland
2012年5月

目 录

《最佳可能的世界》中文版序

为中文版所写的序言

引言	1
第一章 保持节拍	2
第二章 现代科学的诞生	18
第三章 最小作用量原理	32
第四章 从计算到几何	57
第五章 庞加莱及庞加莱之后	73
第六章 潘多拉的盒子	83
第七章 最优者能胜吗	91
第八章 自然的终结	102
第九章 公共利益	116
第十章 我的结论	127
附录一 寻找凸桌面的小直径	134
附录二 一般系统的稳定作用量原理	136
文献注记	138
索引	140

引 言

乐观主义者认为当今世界是最佳可能的世界，悲观主义者却认为未必尽然。从最开始的时候，悲观主义者就思索为什么生活对人类不总是友善的？他们求助于牧师或者哲学家以寻找答案。从1600年到1800年的两个世纪里，有些科学家认为他们能够为解决这一问题作出点贡献。莫培督（Maupertuis）是其中的主要人物。他是法国的一位知识广博的学者、一位探险家，同时还是科学家、哲学家和航海家。他发现所有的物理定律都是一个思想的数学推论，他称之为最小作用量原理：任何事物的发生总是如同在消耗尽可能少的被称为作用量的某种量。如果人们接受了这一观点，那么所有的物理定律都可以用数学方法推导得来。通过声称所有的创造物都遵循类似的原则，他跨越了科学和形而上学之间的界限，所以，比如说上帝安排了历史的进程，那么人类遭受的苦难的总量应该是最小的。这种观点引起了一场激烈的争论，莫培督被伏尔泰（Voltaire）在他著名的小说《老实人》中嘲笑了一番，后来又被莱昂纳多·伯恩斯坦（Leonard Bernstein）在他的音乐剧中奚落了一番。因为哲学家潘格罗斯（Pangloss）在经历了一连串越来越严重的灾难的同时却盲目地声称在最佳的可能的世界里结果好一切都好。

莫培督应该得到更好的命运。从科学上来讲，他的最小作用量原理基本上是合理的。这个原理被不断地继承、转化（也许已经变得完全不同了）、改进，最近它引发了数学上的一系列突破。我有幸参与了这项研究。由于植根于历史的深处，所以它是那么地迷人。我想和大家分享一下我的一些经历和热情。另外，莫培督也许是第一个了解最优化思想——根据某种标准设计的系统将会以最佳可能的方式运行的思想——在现代社会将会变得是多么重要的人。我试着跟上它从物理学到生物学，然后又到社会科学的发展轨迹。这种路线跟我的个人经历多少有些一致。我从数学转到力学，后来又转到经济学，我总是沿着优化的轨迹从一个领域转到另一个领域。在这个旅程中，我的科学兴趣也相应地发生了转变，我发现我现在正在研究人类行为。在我的科研生涯中，越是重要的问题出现得越晚，就像是我需要用积累的知识 and 经验去最终找出正确的答案。

什么是人类？我们正在试图对自己和环境做些什么？这已经不再是一个哲学问题。我们用光地球上资源的方式和在这个过程中的争斗正在成为一个紧迫的和现实的问题。本书就是要尝试展现这些问题是怎样慢慢地从科学发展中浮出水面的，并指出未来的几个发展方向。

第一章 保持节拍

“在继续下去之前,我们必须意识到每个钟摆的拍子都是如此好地被确定和固定以至于除了这唯一的自然方式以外,它不可能按照任何其他的周期运动。”这是伽利略(Galileo)在他出版的最后一本书《关于两门新科学的对话和数学证明》(1638)中所描述的。在这本书出版4年后,伽利略去世了,他给后人留下了丰富的科学遗产,以上的这个简单陈述可能是其中最重要的部分:事实上,它很快就被证明是错误的,但是它改变了我们关于物理运动的观念并且激发了测量时间的一种新技术。

钟摆简单地说是—个—端固定于—条细绳或—个杆上的小重物。在不给予外力的情况下,它垂直地悬着,如果我们把它从垂直状态推开,它就会开始摆动。伽利略发现所有的摆动都持续相同的时间,称之为周期。周期取决于钟摆的长度而不是摆动的幅度或者重物的重量。他还宣称周期随着长度的平方根的变化而变化:要得到两倍的周期,应该使钟摆的长度为原来的四倍。增加重量或者增大幅度都没有效果。这种特性被认为是等时性,这是我们能够准确测量时间的主要原因。

据说伽利略是在比萨教堂的—场仪式中通过对比悬挂于教堂正厅的吊灯的摆动和他自己的脉搏发现这条规律的。多么美丽的象征啊!伟大的宇宙循环、日夜交替、月圆月缺、潮汐涌动、四季轮回经常是历史上演的背景。但是对于我们每个人来说也有—个小—点的同伴,它不是用来测量宇宙时间,而是用来测量生物的,甚至是个人的时间:我们的脉搏是—种天然的怀表。通过自然节奏和我们血液的节奏的对比,可以得出标准时间的观念,这两种节奏都应该是普遍的,对每个人都是立刻适用的,像吊灯的摆动,是均匀的,像我们心脏的跳动,是有规律的。这的确是个革命性的观点,同人类之前积累的所有经验相反:所有自然节奏是变化的,不规则的。脉搏因人而异并且受到情感和身体状况的影响。白昼随着纬度和季节的变化而变化,太阴月也是变化的,准确地定义年是—个重要的天文学问题。比如,如果要想把圣诞节保持在冬至,结合这些节奏,需要带有关于闰年复杂规律的格利高里日历的发明。这还不足够好,因为这些节奏会改变:地球的旋转正在减慢,所以白昼一点点地变长,记录标准时间的原子钟也要偶尔被向前推进—秒。

现在,时间是恒久不变的:—个小时就是—个小时,不论在世界上的任何地方,任何时候,就像—米就是—米,—磅就是—磅。但这是—个相当现代的观点:对于我们的祖先来说时间是不均匀的。在上古时代,在日出日落之间有12个小时,日

落日出之间也有 12 个小时。所以除了在春分和秋分这两天，白天和晚上的小时拥有不同的持续时间。11 点钟到地里劳作意味着大半天已经过去了；在福音书寓言中出现的黎明就到地里干活的人发现并不比那些迟到者的报酬高而感到不公平就不足为奇了。小时的持续时间随着季节和地点的变化而变化：夏天的小时和冬天的小时不同，佛罗伦萨的小时和罗马的小时不同（在那些年代没有对比它们的直接方法）。

钟摆的节奏不是这样的。所有人都可以看到比萨教堂吊灯的摆动，每一次摆动都持续相同的时间。它们慢慢地减弱，最后停止摆动，但是一阵清风吹过或者轻轻一拉绳索，它就又会重新开始按照相同的持续时间摆动，测量出相同的时间间隔。把它带到罗马，它也会不论冬夏，日夜保持和在比萨时一样的节拍。这是伽利略的伟大发现：钟摆给我们提供了一种通用的、均匀的、以自然的方式测量时间的方法。摆动把时间分割成相同的时间间隔，不像那些不容易随身携带，随日期和地点的变化而变化的日、月、年。

在公元前 4 世纪到公元 4 世纪之间的 800 年里，在亚历山大城活跃着一个由希腊数学家组成的特别学派。这个学派始于传说中的几何创始人欧几里得（Euclid），结束于可能是在数学史上第一位留下名字的女数学家——希帕蒂娅（Hypatia）。伽利略和他那个时代的科学家都熟悉他们的工作：他们本质上探索了能用圆规和直尺所作出的所有可能图形，当时也没有更好的工具可用。几何的基本形状仍然是这些由圆规和直尺作出的：线、圆，当然还有圆锥、椭圆、抛物线和双曲线，在这些方面，除了公元前 3 世纪阿波罗尼斯（Apollonius）在亚历山大城所著的专题论文外没有进展。大约在同一时代，另一位伟大的科学家阿基米德（Archimedes）展示了怎样计算这些曲线围成的面积和曲线绕轴旋转得到的体积。亚历山大城的科技也很好，也许比伽利略所能做到的还好。关于建筑和工程的论文幸存下来，其中一些结果的名声享誉了几个世纪。罗马军队围攻锡拉库扎（意大利西西里岛东部港口城市）的三年里，阿基米德制造的战争机器一直放置于海湾上；从海上 30 英里处就可以看到亚历山大港的壮丽海滩。

伽利略像古代的伟大几何学家对待空间一样对待时间：他把时间变成均匀并可测量的量。希腊人有一个成熟的空间理论，这个理论直到 19 世纪非欧几何被发现之前都富有成效并基本上没有任何改变，但他们却没有一个相应的时间理论。他们掌握静力学而不了解动力学。任何类别的运动，如飞向靶心的箭、追赶乌龟的人、投向空中的石块对他们来说都是问题。一旦离开投掷者的手，是什么力量推动着石块呢？追赶者怎样才能追上乌龟？在乌龟所处的位置作一个标记等待追赶者到达；可在追赶的同时乌龟也前行了，这样就有一个新的标记处需要追赶者花费更多的时间到达，但是追赶时乌龟又移动了，所以它总是超前一点，追赶者永远也追不上乌

龟。这是芝诺悖论，显然是由一个空间知识掌握得比时间知识好的人提出的问题。

与几何学家不同，希腊的物理学家不担心运动的可能性——他们仅仅把运动视为事实——但是他们寻找运动的原因。在这一主题上最有影响力的作品是亚里士多德（Aristoteles）写于公元前4世纪的《物理学》。这也是伽利略建立他自称的“新科学”时需要对抗的主要影响力。亚里士多德的物理学是简单易懂的：只要物体移动必有其他的东西推动它，一旦推动力停止，被推动物体一定停止。这种说法也存在问题：为什么石块在离开投掷者的手之后没有立刻落到地上？它为什么先升起，后落下？看伽利略时期绘制的抛射体轨线也很有意思：抛射体先呈拱形升起，然后几乎垂直地急速落下，就像是从轨线的最高点落下。这同亚里士多德所教的相吻合，但这不是实际发生的情况：轨线的第二部分和第一部分是对称的，也是一条弧线。石头为什么最终会落下已经非常清楚了，但是如果解释它为什么先升起则需要大量的独创性，空气被怀疑在承载它时发挥了作用。简而言之，希腊人没有发展出与他们的空间和形状理论相当的时间和运动理论。

毫无疑问，在希腊哲学里，运动和变化同义，因此也是有瑕疵的。真正完美的东西不会变化，它既不会增长也不会消退，是永恒不变的。在柏拉图（Plato）哲学里，完美的事物的确存在；它们构成了唯一的真实现实；我们活着时所见到的只是可怜的完美事物的反射，仅仅是墙上的影子。但是我们死后就可以凝视原物，看到永恒的真善美，并且会把一些记忆带到我们的来生。我们不发现数学真理，我们只是在穿越这个外部世界的过程中回忆起它们。米诺（Meno）对话中有一个著名场景：苏格拉底（Socrates）引导一个未受过教育的奴隶“回忆”根据著名的毕达哥拉斯定理： c 的平方等于 a 与 b 的平方和，矩形的对角线 c 同它的边 a 与 b 有关联。这非常值得一读，也是一个优秀教学的例子。苏格拉底没有告诉奴隶任何东西；他只是以正确的顺序问了他正确的问题，让他自己摸索直到突然看见定理，看见它如此真实、如此不证自明地出现在眼前，就像早就知道一样。柏拉图说，实际上米诺知道这个定理因为他在被以奴隶之躯送回地球之前，在永恒真理的世界里已经见过它。苏格拉底常常说他同其母亲所从事的助产士的职业一样，因为他把人们不知道自己所携带的灵魂的负担释放出来，就像她把妇女们未看到过的后代接生出来一样。

在柏拉图主义的传统里，真理从来都不是被发现的，而是被回忆起的。在两次连续的生命之间，灵魂穿越了死亡和出生前的领域，再一次凝视了完美的、不变的、永恒的理想界，这些是他在尘世上游荡时将要遇到的一切事物的蓝图。甚至“theory”（理论）这个词是那种知识概念的证据：在希腊语里，*theorein*的意思是“去看”，*theoreia*表示“已经看到的事物”。任何短暂的事物，如物理运动，在理想界中都是不值得一提的。我们可以没有关于这件事的理论，因为我们在出生前没有见到过它。只有永恒不变和理想界的完美有些亲缘关系，在希腊哲学里有一个发

展得很好的静止理论,说得更科学点,平衡理论:最著名的例子是流体的平衡理论,据说这一理论曾使阿基米德在最初发现它时兴奋地全身赤裸着奔跑在锡拉库扎的大街上。

如果一个物体出于自身的力量处于平衡状态,它将会永远待在那里。为了使它脱离平衡,我们必须给予它外力,最好是直接接触;这个力是运动的原因,此力一旦消失,运动即停止。这是亚里士多德和他的继承者尝试理解现实世界中我们周围各种运动的智慧框架。这里不乏困难;如解释星星的运动,他们把星星想象成在太阳每天绕行的环绕我们的巨大球体上镶嵌的发光的点,需要召集大量的天使和魔鬼去推动球体外部以使它旋转。在古代和中世纪期间,世界被看做充满了各种令人困惑的运动和各种奋力返回平衡状态的物体。没有一个普遍的理论;对于任何一次运动都必须找出使这一特别的物体在这一特别的时间失去平衡的原因以及它将怎样才能达到新的平衡。这不是一项简单的任务,科学家们为了一些答案摸索了几个世纪。

比如,从罗马时代起人们就发现水一次最多只能被抽到10米高;要想达到更高的高度则需要更多的抽水机,每台抽水机把水抽到一个水池里供另一台抽水机抽,但是每一台抽水机所抽的高度都不会超过10米。对这一问题的解释是自然对真空有一种厌恶,因此在达到一种平衡前,总是趋向于充满宇宙中的每个真空区。为什么这种特别的厌恶会在10米处停止,或者说为什么宇宙会满足于10米高的抽水,这个问题不是最有想象力的解释所能回答的。简而言之,直到伽利略时代,物理运动都被视为是对宇宙基本秩序的一种干扰,这可以由经典几何反映出来。运动是杂乱的。物体的自然状态是静止。

那天在比萨教堂里,伽利略看到了相反的事物:吊灯来来回回地摆动。它越过垂直位置,摆到另一侧,停顿片刻,又摆回来。最终,它会慢下来;它的摆动将会逐渐地以相同的拍子慢下来,直到最后静止地悬挂着,蜡烛烟垂直地升向镀金的天花板。为什么这一位置比带有庄严规律性的来来回回的对称的运动更加自然?是什么阻止它永远摆动下去?是它自己停止的,还是由于周围空气和悬索所施加的摩擦?同以有规律的间隔无限期地经过同一位置的摆动运动的完美相比,这些能算作完美吗?当然,空气没有维持运动,因为我们看到了蔓延的蜡烛烟:一定是运动自己维持自己,在周围环境的作用下减慢了。如果这些可以被纠正的话,钟摆将会像教堂的脉搏一样永远摆动下去。它将会永远消磨相等的时间间隔,因此可以用来测量时间,就像折尺可以用来测量长度。

伽利略的钟摆理论——我们可以用古希腊人所用的与观察等价的理论这个词,因为那天在大教堂里伽利略确实看到了,而且他随后的工作都是回忆和理解他那天所看到的——首先是运动不需要从一种平衡到另一种平衡的基本直觉,即钟摆可以

永远摆动下去，在下落之前，到达轨迹的顶点时，一拍短暂停顿两次。如果它最后减弱并停止，那要考虑各种各样的非理想性，对非理想性的纠正即使不会带来永远的运动，至少会延长运动的时间。第二个伟大的想法是同一钟摆的所有摆动，不论大小，具有相同的持续时间（这是我前面所提到的等时性），持续时间只和长度有关。人类在历史上第一次发现了记时器，一种可以准确测量时间并且便于携带的工具。一个在巴黎，一个在罗马的长度相同的两个钟摆拥有相同的拍子，这与它们摆动的振幅无关。10英寸长的一根细绳是一个简单的记时器。只要在它的一端系一个重物并从另一端使它摆动。一个满拍持续差不多1秒钟；60拍为1分钟，如果你足够耐心的话，3600拍为1小时。一个4倍长的钟摆的速度会减慢2倍：一条1公尺长细绳的半拍为1秒钟。

这是几何学和动力学之间的一个显著的联系。不久后，数学家将会像征服了空间一样征服时间。钟摆的等时性并不真的正确；这只是一种理想化，就像我们在几何里学的直线和圆只是我们实际在沙滩上或纸上画的理想化的直线和圆一样。实际上，钟摆会随着摆动幅度变宽而节奏变缓，我们可以用并排的两个同样长度的钟摆从不同的位置开始摆动的实验来证明。拍子的持续时间，即周期，随着振幅增大而延长；小的摆动，即从靠近垂直的位置开始的摆动，比大幅度摆动的周期短。但是，只要摆动的幅度小，这个差别是非常小的。振幅对周期的影响只在偏离垂直位置远的摆动中才可以被察觉。当然，非常小的差别会在一天或一周的时间里累积，唯一安全的解决方法就是使钟摆精确地保持相同的摆动宽度，老式钟表的机械装置正是这样设计的，这也是它们一开始需要上发条的原因。但是伽利略的思想是正确的，就像直线两端无限长且厚度为零是正确的一样。我们知道画线时，我们不能把线延长到纸张的范围以外，也不需要放大来观察它是否同我们所使用的铅笔的铅一样粗。但是，我们理解这一思想，它在我们建桥、修路和划分界线时有用。同样，只有在小振幅的时候，钟摆会按照伽利略所描述的那样摆动，但这为我们提供了一个理解更一般的摆动和制作时钟的好开端。

这是真正的伽利略革命。据说在他跪在审判席前发誓否认哥白尼(Copernicus)地球绕着太阳旋转的观点后，他站起身来时摸了一下地面说“它仍在转动！”当然，他指的是地球，但这也适合指钟摆这个由于他的天才而转化成同圆周观点一样犀利和富有成效的数学观点的简单物品。周期运动这一思想是时间和空间之间缺失的联系。运动不再被视为短暂的和转瞬即逝的从一种平衡到另一种平衡的简单变化：伽利略的钟摆不变地运动着。它的运动没有起因；没有开始，也没有结束。我们体验的实际时间两端是有界限的——我们的出生和死亡，或者探索得更深一点，宇宙的诞生和灭亡。伽利略的时间不是这样的，因为他的理想钟摆永远摆动下去。在这方面，时间和自欧几里得以来伟大的亚历山大人定义的几何空间非常相似：他们把空

间理解成无界的，虽然物理空间一定是有界的，不是被地球，就是被包围它的天体限制。在这个无界的空间中放一个像比萨教堂里摆动的吊灯一样的伽利略钟摆就有了现代宇宙，这也是至今仍适用的科学构架。

伽利略的思想也为我们提供了一个用来度量时间的自然单位。正如我们所知道的，天和年都不令人满意，因为它们随着日期和位置的变化而变化；另外，它们的时间间隔很大，怎样测量小一点的时间间隔却并不显然。但是选择一个特别的钟摆，比如一个长 10 英寸的钟摆，然后把秒定义为它的周期，即，一整拍的持续时间。用这种方法定义标准时间单位和我们通常定义长度单位的方法非常相似；比如，在法国革命期间，1 米被定义为某一根铍铂合金杆上两个凹槽之间的距离。这一珍贵的杆和它的两个复制品于 1889 年 9 月 28 日被庄严地保存于巴黎附近布勒特伊天文台的拱顶，和它一起被保存的还有标准千克和它的 6 个复制品。小心地制作出更多的复制品，同原样进行比对，然后再送到其他地方制作更多的复制品，直到做成学生们的直尺。我们可以想象时间的标准单位也可以以类似的方式被定义，比如 1 米长钟摆的半个周期，然后将它同长度和质量的标准单位一起保存起来，但是永远摆动。这不是个实用的定义，因为事实上钟摆的周期依赖于地心引力的强度，而因为地球不是一个完美的球体，引力根据地理位置的不同而不同。标准钟摆的完美复制品在不同的地方会有不同的周期。但是让我们更进一小步来追求伽利略的梦想吧。

测量问题并没有通过定义单位被完全解决。我们必须说明怎样把它分成更小的单位。长度单位的这个问题由一个希腊几何学的早期结果解决了，这归功于米利都（Miletus，小亚细亚西南角海岸）的泰利斯（Thales）的一个定理，据说他成功地预报了发生于公元前 585 年的一次日食。也许泰利斯得益于古巴比伦和古埃及的科学成果，这个定理对于测量来说确实太基本了，它一定更早就被人们知道。本质上，如果你的单位乘以 10（即复制 10 倍，然后把复制品首尾相连地摆在一条直线上），你也能把它除 10。当然，在这一结果中，10 并没有特殊的意义，如果你不对公制体系着迷的话，其他数字也可以。但是对于时间单位就没有这种定理：1 小时为 60 分钟，当然如果你能数分钟的话，你可以数 60 下，那就是 1 小时，但是这对于测量持续时间少于 1 分钟的事物却毫无帮助，像 100 米赛跑。用钟摆测量时间为这一问题提供了一个简单的答案：如果你想使摆动快 10 倍，则缩短钟摆为原来的百分之一。如果 1 米长的钟摆半拍为 1 秒，1 厘米长的钟摆半拍为 1/10 秒。这样的钟摆很难造，更难维持其摆动，但这一观点是正确的；让科学家和钟表匠研究这一问题，几个世纪后，你就会拥有超精度时钟戴在手腕上了。

精度对于记时来说是个新鲜事物。在几何里，这是理所当然的事情。比如，阿基米德曾写了一篇名为“测圆术”的文章，致力于找出比值 P/D 的精确值，这里

P 表示圆的周长， D 表示直径。这是著名的数字 π ；阿基米德证明它介于 $223/71$ 和 $221/70$ 之间，并且给出了把它计算到任何精确度的数值程序。很多年来，阿德米德的方法都是完美的，1593 年法国几何学家韦达（Viète）知道了 π 的前 7 位小数，即 $\pi = 3.1415926$ ^①。今天，更好的程序和自动化的计算得出了 π 的小数点后的数十亿位的数字；实际上，我们今天可以直接计算到任何给定位小数而不用考虑介于哪两个数之间。我在此处的观点是我们关于 π 的知识是如此精确以至于在无须考虑其物理意义以后它的位数还很长。在伽利略时代，要想区分 3.1415926 和 3.1415927 之间的区别，已经需要能画圆并能把长度精确到十亿分之一的工具了，这种方法超越了那个时代的技术能力。没有办法实验地检验 10 位数以上的 π 值。但是， π 值本身在数学层面上存在而不在物理层面上存在，它有无限多位小数，我们目前所知道的也只是前 500 亿位左右：数学上的精确是没有止境的。伽利略以后，同样的理论将应用于记时学。描述非常小的持续时间没有问题，如千分之一秒，这只是千分之一毫米长钟摆的半拍。这样的钟摆也许很难制造，也很难观测，但是在理论上没有困难；这是理想的物体，就像 π 的小数点后一千位的数字一样真实。因此，像几何一样，在动力学里，精确是数学的，也就是无限的，我们可以计算到任何我们想要的数位。

随着这种新的测量精度的出现，新的问题也出现了。要测量长度，人们主要是要建立一种一致，即把两个物品拿到同一地点：要测的长度的两端必须和尺子上某刻度相吻合。要测量持续时间，人们必须建立一种同时性，即两件事情同时发生：赛跑者正好在钟摆摆动到最高点时起跑，在另一次摆动的最高点时穿越终点。但是两件事情“在同一瞬间发生”是什么意思？如果两件事情在同一地点发生，或者相距很近，意义非常清楚，但是如果相距很远发生的呢？比如，太远了以至于不能被一起观测。伽利略跪在教堂里可以很好地把吊灯的摆动同他的脉搏相比较。但是如果问在那个时候中国正在发生着什么有意义吗？“同时发生”经得起旅行吗？可以想象宇宙中的一个时间片断——比萨教堂里的吊灯摆动停止、正在迈步的君王、轨道上的行星、漩涡的星系，被同时抓住吗？宇宙的整个历史将只是这些片段的连续，就像电影是照片的连续一样。

比如，如果光是即时传播的话则没有问题：从远处观察到的事件就在它们被看到的那一刻发生，同时性容易被建立。但情形不是这样的，人们需要考虑距观察者的距离、光的路线以及传播速度。换句话说，同时性不能像同时发生一样被直接建立：要说两件事情同时发生需要成熟的光学理论（除非他们发生在同一地点）。比如，如果宇宙被镶嵌在希腊几何的三维无限空间里，光以 $300\,000\text{km/s}$ 的恒速沿直线传播，那么现在从 $300\,000$ 千米外观察到的事情一定发生在 1 秒钟之前。这是伽

^① 事实上中国数学家祖冲之在 5 世纪下半叶（450—499 年）就得到了这一结果。——译者注

利略认为的理论，结果是对于同时性有一个全球的、普遍的意义。天狼星上的观测者如果有一个足够敏锐的望远镜，他可以透过星际空间、大气层、比萨教堂的圆屋顶看到吊灯的摆动；比如，他观测的摆动的持续时间同会众看到的一样，那么他们就可以定义一个天狼星和地球的共同的时间单位。他也知道他所观测到的摆动是在 8.6 年前的地球上发生的，因此和他可以叫出名字的发生在天狼星上的一些事情同时发生。把这些长时间观察到的资料拼接到一起可以得到一幅一千年前或一百万年前宇宙的部分景象——延迟的时间越长，覆盖的区域越广。

所以整个宇宙在某一特定瞬间的想法没有意义，我们知道这一点，伽利略也肯定知道这一点。比如，人们可以想象各星系中的各位宇航员各携带一架显示相同日期和标准时间的宇宙标准时钟。无论两名宇航员何时相遇，来自何地，他们的时钟将显示相同的标准时间。一位乘坐太空船飞离地球的旅行者返回后发现他同留在家里的人们变老的岁数完全一致，他所携带的时钟也和他留在地球上的那架时钟显示的时间一致。

当然，这与爱因斯坦（Einstein）狭义相对论的现代光学理论大相径庭：空间旅行者将会在返回后发现他的时钟同留在家里那架相比慢了，对地球上的人而言更多的时间消逝了。无疑，人们不能在这一理论里定义任何宇宙标准时间，也没有人能够决定发生于不同地点的两件事情是否同时发生。空间旅行者怎样把他的日历跟地球上的日历协调一致呢？不论他两年前离开（他的时间）还是 20 年前离开（地球时间），到目前为止，协调得还不错。旅行者和留下的人们都同意那一点，因为他们在旅行开始和结束时都在一起，他们可以简单的对比一下时钟。但是假设旅行者被告知他妈妈三年前去世了；他问自己这件事情发生时自己在做什么有意义吗？实际上，根据相对论，这没有意义：同时性只对发生在同一地点的事情成立。没有办法把时间从一处带到另一处。假设我对照某一显示标准时间的时钟对好了我的手表，然后到另一地方旅行，在那里我对照我的手表设置了另一架时钟的时间。然后我返回到第一架时钟处，发现它跟我的手表所显示的时间不一致了！我可以声称我设置的第二架时钟仍然显示宇宙标准时间吗？只要涉及的各种速度远小于光速，区别就非常小（实际上，不能被发现）。但是，只要速度一接近光速（这种事情经常在亚原子层面发生），区别就会变得重要（需要加以考虑）。

伽利略和爱因斯坦的理论在不同的层面都是正确的。的确，直到 19 世纪末研究电磁波（包括光）之前，伽利略的时空理论在科学上是够用的。直到那时，某些宇宙标准时间的观念是非常合理的，只要不考虑非常大的范围（宇宙）或非常小的范围（亚原子粒子），对今天的大多数科学来讲，它仍然足够好。

制造一台可以记录巴黎（或格林尼治）时间的记时器很快成了一个主要的技术挑战，这种记时器可以在全世界范围内携带，有时还是在比较差的环境中。这不是一个把伽利略的思想诉诸检验的问题，而是确定海洋中船只位置的问题。这需要经