

外研社·哈佛科学人文译丛

GALILEO



伽利略的钟摆

——从时间的节律到物质的制造

(美) 罗杰·G. 牛顿 著
路本福 苗蕾 译



外语教学与研究出版社

外研社·哈佛科学人文译丛

GALILEO



伽利略的钟摆

Galileo's Pendulum

From the Rhythm of Time to the Making of Matter

(美) 罗杰·G. 牛顿 著
路本福 苗蕾 译

外语教学与研究出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

伽利略的钟摆 / 罗杰·G. 牛顿著; 路本福, 苗蕾译. — 北京: 外语教学与研究出版社, 2007. 4

(外研社·哈佛科学人文译丛)

ISBN 978-7-5600-6522-9

I. 伽… II. ①罗… ②路… III. 时间—节律—研究 IV. P19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 041855 号

出 版 人: 李朋义

项目策划: 彭冬林 满兴远

责任编辑: 程 蕾

装帧设计: 牛茜茜

出版发行: 外语教学与研究出版社

社 址: 北京市西三环北路 19 号 (100089)

网 址: <http://www.fltrp.com>

印 刷: 北京画中画印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 9

版 次: 2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5600-6522-9

定 价: 19.00 元

* * *

如有印刷、装订质量问题出版社负责调换

制售盗版必究 举报查实奖励

版权保护办公室举报电话: (010)88817519



出版说明

20世纪的文化是以现代科学为基础的文化，21世纪的文化则将是科学精神与人文精神高度融合的文化。这已是学界的共识之一。

秉承我社“记载人类文明，沟通世界文化”的一贯理念，我们组织翻译了这套“外研社·哈佛科学人文译丛”，目的有两点：其一，在于搭建一个阅读平台，让国际上最高端的科学教育读物能在最短时间内进入中国；其二，在科学与人文的两极之间“执两用中”，寻索那些最能将科学精神与人文精神相融合的优秀图书，并推荐给中国的读者。

“外研社·哈佛科学人文译丛”将涵盖在21世纪人类所无法回避的那些最基本、最重大的问题：诸如生命科学、量子力学、全球气候变暖、宇宙起源、开源软件，等等。哈佛大学出版社在世界范围内遴选的这些一流作者，将为中国的读者提供他们在这些命题上的最新思考。而所有这些思考，回答的无非是三个终极问题：我们从哪里来？我们是谁？我们往哪里去？

相信这套丛书将会为我们每个人在面对这些问题时提供新的启示与灵感。

外语教学与研究出版社

2006年12月

TO BENJAMIN,
WHOSE TIME HAS JUST BEGUN



仅以此书献给**本杰明**，他的时代才刚刚开始

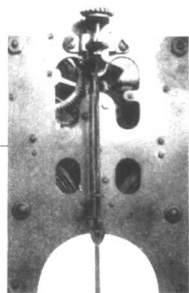


自序

这是一本关乎远古历史和现代科学的书。虽然它的主题并不是希腊神话，但其目的却可以理解为是要描述特耳西科瑞——司舞蹈与韵律的缪斯——对我们生活的广泛影响，以及科学是如何通过“伽利略的钟摆”成功地驯服了被欧里庇得斯称为“无法测量又狂放不羁”的时间。钟摆摆锤的周期性运动对现代科学和数学的发展产生了非同寻常的影响。这种影响最终不仅扩散到了我们对所有随时间变化的自然现象的理解，而且改变了科学对于整个物质世界存在的认知观点——组成我们所能触摸到的物质的粒子，以及我们赖以感受到周围环境的声与光。当特耳西科瑞借助科学的力量，最终颠覆了她的父亲——宇宙的主宰，强大的宙斯——的时候，希腊神话才臻于完美。

我要感谢两位生物学家戴维·基欧和阿瑟·科克，感谢他们对生物学领域相关问题的探讨，以及给予我的宝贵建议。作为一名物理学家，我对这些知识一无所知。如果该书的相关领域依然存在这样或那样的不足，那肯定是我自己的过错所造成的，而绝非他们的原因。当然，我还要感谢我的妻子露丝，她在该书的编辑上给予了我慷慨的协助。





引言

他那时只有 17 岁，早已厌倦了比萨大教堂庆祝活动的弥撒曲。这名年轻的医学院学生正在寻找一些可以吸引其注意力的东西，这时，他的目光停在了高悬于天花板下的树枝形吊灯上。吊灯挂在一条长长的细链上，在和煦的春风里轻轻地来回摆动着。年轻人的好奇心被触动了，他想知道吊灯来回摆动一次的间隔会是多久，于是，他开始用自己的脉搏为吊灯的摆动计时。他惊奇地发现，无论是处于几乎纹丝不动的状态，还是在春风的吹拂下产生大幅度摆动的情況下，吊灯完成一次来回摆动所经历的脉搏跳动次数竟然是一样的。这位具有敏锐观察力的年轻人注定了会为人类带来更多的重大发现，他的名字就叫伽利略。

正如其传记作者文森罗·维维亚尼所说，关于伽利略是如何发现简单钟摆的等时性的传说无疑是杜撰的，但无论是他发现了这种特性的事实，还是这种发现在此后几个世纪里对我们的文明所产生的深远影响，都是我们无可否认的。这是一本关于时间节律的书，它向我们讲述了时间节律最终是如何通过伽利略的钟摆得以校准的，阐述了钟摆的摆动如何影响了我们对上述节律的认知，以及这种摆动后来是如何被发现存在于许多其他自然现象之中的。

前三章奠定了全书的基础，描述了在钟摆的稳定摆动出现之前就已经存在的时间节律：生命有机体关于日夜更迭的早期印记、各种文明试图理顺阴历和阳历周期关系的历法演变过程，以及直到中世纪才出现的更短的时间间隔





计算方式。无论是大自然用来把节律植入生物体的生理机制，还是人类发明的各种用于记录上帝赋予我们的时间周期的方法，都不会是稳定和精确的。但前者足以让它们获得一种适者生存的优势，使它们成为一个遍布地球的特殊生命形式，至于后者，则亘古以来就恰当地满足了人类的各种需要。

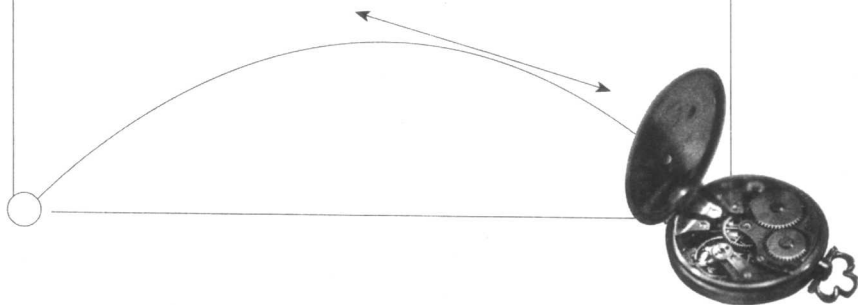
然而，到了文艺复兴之后，商业和科学的飞速发展带来了巨大的压力，人们需要更精确地测量时间。如果人类从来没有发明出一种稳固可靠的时钟，那么西方文明的发展进程将会遭遇严重的阻碍。这种时钟对于大型海上导航和现代科学的发展都是必需的。钟摆以及后来出现的其他类似的机械装置都很好地满足了这一需求。

令人惊奇的是，谐振器——也就是伽利略的钟摆——的物理学原理虽然使得对时间流动的调谐成为可能，但其应用并没有仅仅局限于制造精确的时钟装置。人们发现它不仅仅构成了我们所听到的乐声和所看到的光线颜色的基础，而且也是我们借助量子理论所理解的宇宙结构的基础。如果没有了谐振器，就不会有粒子的存在：没有了可以呼吸的气体，没有了维系生命的液体，没有了构成土地的固体。该书讲述的就是大自然中最简单、但也是最基础的物理系统的故事，你也可以从该书中了解到这种物理系统是如何与时间节律以及我们的真实物质存在紧密地连接在一起的。

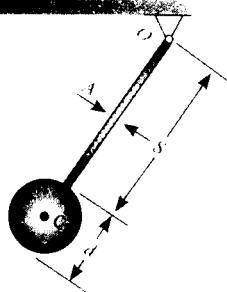


目 录

1	自序
3	引言
1	第一章 生理计时：身体的节律
19	第二章 历法：迥异的鼓手
31	第三章 早期的钟表：家庭作坊式的节拍
43	第四章 摆钟：大自然的韵律
59	第五章 后继者：无所不在的守时性
75	第六章 牛顿：钟摆的物理学原理
89	第七章 声与光：无所不在的振动
111	第八章 量子：组成粒子的谐振子
125	注释
127	参考文献



第一章



生理计时：
身体的节律



—— 块巨石呼啸着，在宇宙中永无休止地飞驰。它既不围绕某颗恒星公转，也没有自身固有的自转轴。当然，也没有绕其旋转的卫星（先别担心这样的世界是否缺少维系生命存在的光和热）。这只是一个单调的世界，暂时没有任何变化，没有清晨和夜晚的更迭，也没有春夏秋冬的变迁。

设想在这样一块大石头上，如果存在智能生物的话，他们的生物体内是否会有内置的天然时钟？或者他们是否有时间流逝的概念？答案很可能会是否定的。我们关于时间流逝的全部想法都是基于对周期性变化的感知，基于永恒重复的日夜更迭（从旭日东升到日薄西山的一段时间形成了白天，而月悬苍穹是夜晚的标志），基于往复呈现的季节变迁。节律是时间的天性，而周期性是我们自身存在不可分割的一部分。

1931年，美国著名飞行家威利·波斯特独自驾驶单引擎飞机温妮·梅向西飞行，创下环游世界的壮举。波斯特也因此成为了探寻和记录飞行时差感的第一人，这种令人烦恼的现象现在已经广为人知。作为飞行员，他注意到了在不同地理经度上的时间改变所带来的影响，据说他发现了人类身体每天所能够适应的时区变化范围不超过两小时。至于他的这种经历在多大程度上是飞行疲劳所导致的后果，我们就不得而知了。

虽然人体的生理机制并不能对现代时钟的精确性和稳定性起多大作用，但对时间及其节律的感知的确成为了人体机能的重要组成部分。其中我们最为熟悉的莫过于心脏的搏动了，这种有规律的体内节律就与时钟类似。如果传说可靠的话，伽利略就是借助自己脉搏的跳动发现了钟摆定律。这种

定律对其后所有的时间测量装置都产生了意义深远的影响。然而，还有其他的生理计时装置在我们的生活中扮演着至关重要的角色，而且它们的周期要更长一些。所有这些体内计时装置的前行速率虽然各不相同，但它们之间的有机协作却完全是自动完成的。我们现在知道，经过几天时间后，我们体内的生物钟就可以通过重置与一个变化的节律实现完美同步。即便是经历一次从大西洋到太平洋的长途飞行，我们体内生物钟与当地时间的差异也会慢慢消失。

1959年，出现了一个专有名词“昼夜节律系统”(circadian system)，用来描述即使在没有外部暗示的情况下，也能以24小时为一个周期记录时间流逝的体内生物钟。在拉丁语中，circa是“大概、差不多”的意思，dies则代表“一天”，由于这种生物钟的周期大概是24小时，所以用这两个单词合成了circadian这个术语。虽然在过去200多年的时间里，生物学家对这种生物钟和其他生物钟多少有所了解，但比较深入透彻的研究却集中在过去的半个世纪里。

在所有受昼夜节律控制的人类生理变量中，科学家首先观察到的是脉搏和体温。即便是不吃不喝，静静地躺在床上，一个人的深层体温在早晚也会存在约 1°C 的差异，清晨时体温较低，而下午时相对较高。早在150多年前，人们就发现肾脏分泌物的数量在一天之中也会有升有降，这种分泌物可以对血液中一些必需物质的浓度进行调节，比如盐分。这种以24小时为周期的类似生理和心理变量另外还有100多个。比如说，儿童的数字计算速度在清晨时最低，在中午之前较高，在下午的晚些时候降至最低，到了下午6点钟左右达到顶峰，然后到了晚上又开始下降。这期间速度差距大约为10%。对于儿童计算速度的测量最早是在1907年进行的，

50 年之后又重复了一次，两次测量的结果基本一致。

由此出现了一个颇有争议的问题，那就是人类的昼夜节律在多大程度上是一种自动的机理，而不仅仅是对外部信号的一种反应，比如光线强弱的变化、一日三餐的时间或者我们周围相互作用的社会活动？要得到这个问题的答案绝没有那么简单。在某些情况下，来自外部信号的影响作用是很值得怀疑的，但也是非常难以捉摸的，比如在一天之中时刻变化的电场所可能带来的干扰。尽管如此，在很多科学实验室内，针对人类和非人类物体所进行的严谨实验都得出了一个非常肯定的结论：我们的体内存在一个自动的计时装置。一些志愿者对得出这个答案做出了贡献，他们被人为地长期置于一个与世隔绝的环境中，有时会被关闭在隐蔽的洞穴里，没有任何可以暗示时间的物质存在。1938 年，两名来自芝加哥大学的研究人员在位于肯塔基州猛犸洞穴的一个密室里生活了 32 天；大约 30 年后，一名法国洞穴学者在阿尔卑斯山脉一个位于地下 375 英尺的阴冷洞穴里呆了两个月。每当进食、入睡和苏醒时他都会通过电话告诉地面的支持者。这名法国学者详细记录了自己在洞穴中对于时间流逝的想法和印象。所有这些探险家都发现他们难以摆脱体内时间信号的控制。然而，测量得出的结果却表明，他们身体变量的周期（所有变量之间的协调都非常完美）以及他们对一天时间周期的主观印象、他们睡眠和苏醒的时间间隔都要稍微多于 25 个小时。当他们从长期的隔离状态回到现实中时，他们体内的生物钟与外部 24 小时时钟的差距已经长达数个小时了。

这里有两个问题必须区分清楚：一个是生物钟前行的“速度”（节律周期的决定性因素），另一个是在给定时间内生物钟节律的“相位”。在从纽约到洛杉矶的飞行中，即便戴的

是一块非常精准的手表，在到达目的地后也会出现三个小时的相位变化，所以必须重新设置时间。而走得慢的手表——也就是说，手表前行的速度滞后了——会随着时间的流逝在相位上与精准计时装置出现越来越大的相位差异；由于其节律周期要比精准参照时钟的周期长，所以要让其正确地显示时间，必须不时地对其进行重新设置。

人们一般认为心理上的激发响应反应不会随时间的变化而变化，但在某些情况下，未知昼夜节律的存在会对用于测量激发响应反应的实验造成妨碍。另外，由于内生节律的周期多少与 24 小时有一定的差距，所以要察觉这种妨碍并不总是那么容易：即便是在每天同一时间重复相同的实验，也并不必然能够消除系统误差的存在，该误差是由实验对象的反应变化所带来的，而其反应则取决于一天内进行实验的特定时间。如果有超过一个的节律在起作用（外部信号以及其他略微不同的昼夜节律），实验结果可能会变得非常令人迷惑不解。

现在，生物钟具有自主性已是不争的事实。在与外部环境信号隔绝的情况下，一个人的昼夜节律系统会以均速前行，而且其节律周期会比以 24 小时为周期的一天长一些。如果未处于隔绝状态，人体的昼夜节律系统会随着环境变量——主要是光的强度——持续调整，以便与太阳的循环周期保持同步。换句话说，虽然遵循着一个稳定的速度，但我们体内的生物钟每天都会慢一个小时候左右。不过由于生物钟能够随着光线明暗的变换周期持续重置，所以在正常状态下，这种时间的丢失并不会累加，我们体内的生物钟也因此得以与太阳的节律保持一致。

当然了，人类只是大自然中的物种之一，昼夜节律也只



是生物节律中的一种。除了心脏的搏动之外，还有一些体内计时装置的周期要更短一些，它们被称为次昼夜节律，比如说脑电图描记器（EEG）所测量的大脑电场活动的周期仅为0.1秒。不过，也有一些节律的周期要比昼夜节律长，比如说女人的月经周期为28天，调节狗熊冬眠的近年节律则接近一年，我们可以推测，另外一些体内生物钟的周期有可能还要更长一些。看起来有节律的行为应该是大部分生物系统所共有的特性。

萤火虫的同步闪光周期比较短（一般为1秒钟左右，但不同的种类可能会略有不同）。生活在马来西亚和新几内亚的雄性萤火虫常成千上万地聚集在树丛中，它们会非常有节律地同时发出闪烁的光亮，场面相当壮观。人们发现它们各自都有独特的内在次昼夜闪光周期，但当它们大量聚集到一起的时候，所有的萤火虫就会自动把闪光周期调整为同步。（用闪烁的手电筒也可以引发这些萤火虫的同步闪光。）¹

在有些情况下，某些行为看起来需要周期较长的计时装置，但事实上需要的仅仅是一个昼夜节律系统而已。以加拿大的雪靴兔为例，其皮毛在夏天呈棕色，在冬天则呈白色。为了形成一种保护性伪装，雪靴兔通常会在第一场雪飘落之前开始改变皮毛的颜色。但雪靴兔判断夏天来临所依据的并不是近年节律生物钟，而是一种昼夜节律计时系统，雪靴兔通过该系统记录白天和黑夜的相对数量，从而判断出夏天是否到了。如果在七月份白天的一段时间内把它们眼睛蒙上，其皮毛变色的开始时间就会提前。其他哺乳动物也会利用近年节律和昼夜节律生物钟来调节新陈代谢和生殖周期，以便在体内积累足够的脂肪抵御冬天的严寒，也能保证幼崽出生在一个比较舒适的季节，而且有充足的食物来源。在上述情

况下，白天的长度也有助于生物节律发挥作用，即使这些节律的周期要比 24 小时长很多。生活在沿海水域中的某些螃蟹内生有潮汐节律生物钟，可以帮助它们了解极为重要的环境节律——潮汐。还有一些海洋动物的产卵期和繁殖期也会受到体内生物钟的控制，而其生物节律则直接受到月亮圆缺的影响。

1910 年，瑞士医生奥古斯特·福雷尔的一个偶然发现揭开了昼夜节律计时系统严肃研究的序幕。医生到自己位于阿尔卑斯山地区的房子避暑，他通常在房子外的露天阳台上吃早饭，不久他就留意到桌子上打开的果酱罐吸引了附近一个蜂房的几只蜜蜂光临。医生并没有太在意，但在接下来的几个早晨，他好奇地发现在早饭准备好之前这些蜜蜂就已经聚集在餐桌旁了，看起来它们在殷切地盼望医生奉上果酱。为了免受这些不速之客的骚扰，医生决定转到房内进餐。奇怪的是，这些蜜蜂依然会在每天的同一时间如期而至，在外面的餐桌旁寻找食物。由于这些蜜蜂从来没有在其他时间造访过他的房子，所以医生得出了一个结论：蜜蜂肯定“对时间有记忆力”。

大约 20 年后，个体生态学家英格堡·贝林和卡尔·冯·弗里希对进行了个别标记的蜜蜂展开了系统的观测，他们在几天之中的固定时间为这些蜜蜂在固定的地点提供糖水。在进行观测的日子里，他们会把糖水拿走，结果这些研究者发现每一只做有标记的蜜蜂都在原来的地点出现了，并且平时的“训练”时间是蜜蜂出现的高峰阶段（有些蜜蜂选择稍微早那么一点点飞过来）。然而，这种“时间训练”只有在进食间隔为 24 小时或接近 24 小时的情况下才会成功，如果间隔改为 19 小时或者 48 小时，训练就会以失败告终。为了确



保这些蜜蜂不会察觉到一些实验者忽略的外部线索，贝林将一些实验地点选在了位于地下深处的岩盐坑里。马克斯·伦纳曾在自己位于法国的实验室里训练了一些蜜蜂，让它们习惯于在晚上八点一刻享用食物，而在第二天乘飞机来到大西洋彼岸的纽约市继续实验。结果这些蜜蜂仍然会像往常一样出来寻觅它们的美味佳肴，不同的是它们会在法国时间的晚上八点一刻左右出现。

事实证明，仓鼠和其他啮齿类动物对于研究哺乳动物的昼夜节律非常有用。把它们关在有稳定光源照明的笼子里，不提供任何有关昼夜变化的线索。笼子里放置一个可以用来锻炼的轮子，它们可以自由地嬉戏玩耍。实验结果表明，它们每天都会在几乎相同的时间出来锻炼，而且锻炼持续的时间也几乎完全相同；另外，它们进食和喝水的时间也同样是非常规律的。这些实验表明：在没有外部线索干扰的情况下，很多昼夜节律“习惯”会持续相当长的一段时间，甚至会陪伴动物的一生，当然也有一些“习惯”会比较早地慢慢消失。

在 20 世纪中期以前，长途迁徙的鸟类那非凡的识途能力一直被认为是一个伟大的奇迹。现在我们知道这些能力至少部分是基于它们的昼夜节律系统。太平洋金斑鸫鸟每年秋天都会跨越 2,000 多英里从阿留申群岛飞到夏威夷过冬，然后在第二年的春天再飞回阿留申群岛。虽然太阳在一天之内的位置会不断变换，但体内的生物钟让这些鸟类能够追寻太阳的方向飞行：在清晨的时候，让太阳处于身体的左边意味着往南飞；到了下午，则让太阳位于身体的右边。鸟类可以依据一天时间的变化确定太阳所处的位置，第一个通过实验证明鸟类具有这一能力的是动物学家古斯塔夫·克雷默。他在一个圆形的鸟舍里养了一些八哥，太阳光通过墙上的开口