

FROM BEING
TO BECOMING

TIME AND COMPLEXITY
IN THE PHYSICAL SCIENCES

从存在到演化

自然科学中的时间及复杂性

[比] 伊·普里戈金 著

上海科学技术出版社

从存在到演化

自然科学中的时间及复杂性

[比] 伊·普里戈金 著

曾庆宏 严士健 译

马本堃 沈小峰

刘若庄 方福康 校

上海科学技术出版社

From being to becoming: time and complexity in the
physical sciences.

Ilya Prigogine

1980 by W. H. Freeman and Company

责任编辑 潘友星

从存在到演化

自然科学中的时间及复杂性

[比] 伊·普里戈金 著

曾庆宏 严士健

马本堃 沈小峰 译

刘若庄 方福康 校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

发行所 上海发行所发行 上海市印十二厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 8.5 字数 218,000

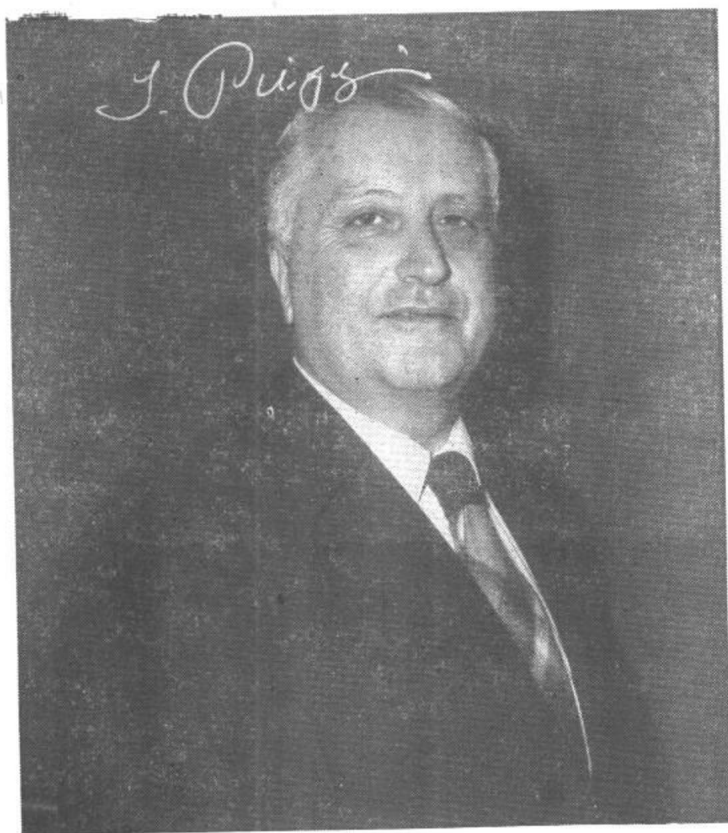
1986 年 3 月第 1 版 1986 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—2,900

统一书号: 13110·1299 定价: 1.90 元

内 容 提 要

本书对耗散结构理论作了简明扼要又较系统的介绍，是本导论性的入门书。不可逆性及时间在描述物质世界演化过程中的作用是该书的主题。原著者普里戈金教授是耗散结构理论创始人，1977年诺贝尔化学奖获得者。他认为不可逆性可能是有序的源泉、相干的源泉和组织的源泉。全书共三篇十章，上篇为“存在的物理学”，中篇为“演化的物理学”，下篇为“从存在到演化的桥梁”。本书在中等水平上写成，可供高中以上文化程度的各方面读者阅读。



伊里亚·普里戈金 (Ilya Prigogine)
(比利时布鲁塞尔自由大学和
美国奥斯汀得克萨斯大学)

你来，请轻轻地将我抱在怀里，但不要太紧，以免玻璃破裂。这本是事物的常理：宇宙对于自然物都嫌太窄，人工的产品需要隔绝的天地。

——歌德：《浮士德》
第二部*

* 译者注：译文引自郭沫若的中译本，人民文学出版社1978年版第117页。

中 译 本 序

(一)

为我的《从存在到演化》一书的中文译本增加这个简短的序言是一件非常荣幸的事。尽管当代科学所提出的问题和方法的范围极其广泛,但是有些问题是贯穿这整个领域的,例如时间的问题和观察者所起的作用问题。有人会想,我们所观察到的生物进化或社会发展应当看作是嵌在一个不变化的广袤的宇宙之中的。但情况并非如此,现代宇宙学表明,整个宇宙也是在演化的。还有,在物理学的经典概念中,对于观察者所处理的自然界没有任何理论上的限制。我们现在开始看到了这个概念的局限性,而这些局限性又和时间及不可逆性的问题有密切的关系。

这个异乎寻常的发展带来了西方科学的基本概念和中国古典的自然观的更紧密的结合。正如李约瑟(Joseph Needham)在他论述中国科学和文明的基本著作中经常强调的,经典的西方科学和中国的自然观长期以来是格格不入的。西方科学向来是强调实体(如原子、分子、基本粒子、生物分子等),而中国的自然观则以“关系”为基础,因而是以关于物理世界的更为“有组织的”观点为基础。

这个差别在今天即使和几年前的想法相比,其重要性也显得小得多了。

我相信我们已经走向一个新的综合,一个新的归纳,它将把强调实验及定量表述的西方传统和以“自发的自组织世界”这一观点为中心的中国传统结合起来。

西方科学诞生在十七世纪的欧洲,一个特殊的承前启后的社会和宗教环境之中。我相信在二十世纪末的今天,科学将会给世

界带来更为普适的信息。

1979年我有幸到西安参加了“非平衡态物理”的一个专题讨论会*。这个学科在中国所引起的兴趣给了我非常深刻的印象,我期望这本书的翻译将使这个兴趣保持下去,因为我确信,这个领域仅仅处于它的幼年时期,而年青一代的中国科学家一定会作出重要的贡献,当我在中华人民共和国停留的时候,他们的才智和热情更加深了我的这个信念。

最后,我愿乘此机会向钱三强教授和郝柏林教授表示感谢,感谢他们给予我的友谊。

(二)

我非常高兴这本专著的中文译本即将出版。自从这本专著发表以来,人们对不可逆过程的兴趣正在按指数比例增加。不可逆过程在许多科学领域中起着决定性的作用,这一点现在已十分明显。有兴趣的读者可以参阅最近的会议文集^①。按照这本专著中所论述的观点,应当特别强调:不可逆性正在引起空间、时间和动力学概念上的巨大变化。甚至在贝纳尔(Bénard)不稳定性之类最简单的情形中,我们可能已注意到不可逆性带来的空间对称性的破缺,与此类似,化学钟导致了时间对称性的破缺,因为两个不同的时刻不再起同样的作用。此外,自然界本身变为由逐次分支而形成的一个历史的对象。

用这种新的眼光来看,越来越难以接受那种传统的观点:不可

* 译者注:1979年8月,普里戈金教授应中国科学院副院长钱三强的邀请来华讲学,在西安参加了中国物理学会召开的全国第一次非平衡态统计物理(耗散结构专题)学术会议并在会上作了学术报告。

① 即 G. Nicolis, F. Baras 编的《化学不稳定性:在化学、工程、地质和材料科学中的应用》(*Chemical Instabilities: Application in the Chemistry, Engineering, Geology and Material Science*, Reidel, Dordrecht, 1984); 以及 L. E. Reichl, W. C. Schieve 编的《化学系统中的不稳定性、分支和涨落》(*Instabilities, Bifurcations, and Fluctuations in Chemical Systems*, University of Texas Press, Austin, 1982)

逆性出现在宏观水平上，而在作为基础的“单元”水平上却用时间可逆的定律来描述。这个问题已在本书的第一版中加以讨论，不过讨论得相当粗略。因此，我决定增加新的一章：“不可逆性与空时结构”，它可以作为一个有益的导论。它包括一些在本书第一版出版以后才研究出来的新成果。

简而言之，我们的方法如下：我们把熵增加定律以及隐存的“时间之矢”看作自然界的基本事实。于是，我们的任务便是研究由于把第二定律作为一个基本假定引入所带来的空间、时间和动力学概念结构的变化。认为这种观点正确，其原因是注意到：出现在我们周围的自然界是时间上不对称的。我们大家都在变老！谁也没见过哪一位明星遵从相反的顺序。正是这个经验事实引导我们去研究这样的可能性：把所允许的态映射到一个收缩半群中去，而这个收缩半群描述的是未来向平衡态的趋近。简单地说，这种观点把第二定律看作是从动力学定律生出的一个选择原则。总之，这个选择原则告诉我们：在不稳定的动力学系统中，对所涉及的一切自由度来说，我们不能规定一个通向共同未来的初始条件。由于这个原因，我们在量子散射中观察到出射的球面波不是通过散射和同一量子态相联系的会聚波。还和我们在本书第一版中提到的一样，仅对那些高度不稳定的经典系统或量子系统，这样的选择原则才成立。没有人想要理想化的无摩擦的谐振子去遵守热力学第二定律。

在我看来十分了不起的是：这个方案现在已能在一类重要的动力学系统中严格地得以实现。这类重要的动力学系统就是所谓 K 流（字母 K 取自Kolmogoroff，科尔莫戈罗夫），第十章的绝大部分篇幅都是研究 K 流的。通过一种特殊形式的非局域变换（它包含破缺的时间对称）作中介，能够从动力学时间可逆的机械论的描述过渡到概率论的描述。

在这个过渡中起着根本作用的是一个新的时间概念，即内部时间，它和天文学时间根本不同。虽然仍能用钟表或其他动力学装置去测量它，但它具有完全不同的含义，因为它得自不稳定动力学系统中存在的轨道的随机性。这个变换在空间中同时也在时间

中导致一种非局域性的描述。其特征标度由运动不稳定性的量度(如第十章引入的李雅普诺夫指数)所提供。正是这个非局域性允许我们避开在动力学描述中固有的不稳定性,并导致一种使脆弱的平衡(delicate balancing)成为可能的描述,而我们在自然科学的如此多的部分中都观察到这种脆弱的平衡。

特别值得注意的是,沿着这条道路,我们被引到“空间的时间选择”(timing of space),它由在空时连续统内发生的不可逆过程来决定。我们远远离开了传统的空时静观。

当然,我们意识到在我们自己的生命中存在着时间之矢。此外,生物学还使我们通晓了进化的范例。按照这本专著的看法,现在这个进化的范例正被扩充,以便组成包括第二定律在内的一切过程的基础。简言之,时间和不可逆性一样不再把我们和自然界分开。正好相反,热力学第二定律表达出我们属于一个进化着的宇宙。

我们的计划是把第二定律合并成一个基本的动力学原理。这个计划是新近才提出的,许多地方还需要补充的研究和说明。在第二定律作为一个基本原理的蕴含被更完全地披露之前,还需作大量的工作。这个问题无论是对我们理解动力学的原理,还是对我们认识概率论以及空时结构,都是如此重要,因此在这第二版中给出一个“进展报告”是有价值的。这个进展报告希望引起读者对这样一个领域的兴趣,该领域以诱人的方式把对非平衡态热力学的新见解与动力学系统理论结合起来。

我要感谢我的同行刘若庄、严士健、方福康、马本堃、沈小峰诸教授和曾庆宏工程师,感谢他们在翻译中所作的工作。我觉得从本书得出的对自然界的描述非常接近中国的关于自然界中的自组织与谐和的传统观点。因此我真诚地希望这本专著在中国的出版将使在中国和在西方世界发展起来的文化传统间的创造性的对话保持下去。

伊·普里戈金

中译本序

序言1

第一章 绪论：物理学中的时间.....11

 动力学描述及其局限性11

 热力学第二定律14

 不可逆过程的分子描述18

 时间和动力学20

上篇 存在的物理学

第二章 经典力学.....26

 引言26

 哈密顿运动方程和系综理论28

 算符32

 平衡系综34

 可积系统35

 遍历系统37

既非可积又非遍历的动力学系统	42
弱稳定性	45
第三章 量子力学	49
引言	49
算符及并协性	51
量子化规则	53
量子力学中的时间变化	57
量子力学中的系综理论	60
薛定谔表象和海森伯表象	62
平衡系综	63
测量问题	64
不稳定粒子的衰变	66
量子力学是完备的吗?	68

中篇 演化的物理学

第四章 热力学	74
熵和玻耳兹曼的有序性原理	74
线性非平衡态热力学	80
热力学稳定性理论	84
化学反应中的应用	88
第五章 自组织	95
稳定性、分支和突变	95
分支: 布鲁塞尔器	100
分支的可解模型	106
化学和生物学中的相干结构	109
生态学	112
结语	116
第六章 非平衡涨落	117
大数定律的破缺	117
化学博弈	120
非平衡相变	123
非平衡系统中的临界涨落	125

振荡及时间对称破缺	126
复杂性的限度	128
环境噪声的影响	129
结语	131

下篇 从存在到演化的桥梁

第七章 动力论	136
引言	136
玻耳兹曼动力论	139
相关和熵的复原	144
吉布斯熵	148
彭加勒-米斯拉定理	149
新的并协性	151
第八章 不可逆过程的微观理论	155
不可逆性以及经典力学和量子力学表述的扩展	155
新的变换理论	157
熵算符的构成和变换理论: 面包师变换	161
熵算符和彭加勒突变	165
热力学第二定律的微观解释: 集体模式	167
粒子和耗散: 非哈密顿的微观世界	168
第九章 变化的规律	172
爱因斯坦的困境	172
时间和变化	174
作为算符的时间和熵	177
描述的级别	180
过去和将来	181
开放的世界	183
第十章 不可逆性与空时结构	185
作为一个动力学原理的热力学第二定律	185
架设动力学与热力学间的桥梁	189
内部时间	197
从过去到将来	200

熵垒	203
不可逆性和非局域性	205
玻耳兹曼-格拉德极限	207
向宏观表述的过渡	208
空时的新结构	209
态和规律——存在与演化间的相互作用	212
结语	213
附录 A 面包师变换的时间算符和熵算符	217
附录 B 不可逆性与动力论方法	224
相关的动力学	224
超空间中的量子力学散射理论	228
附录 C 熵、测量和量子力学中的迭加原理	232
纯态和混合态	232
熵算符和运动生成元	233
熵超算符	235
附录 D 量子理论中的相干性与随机性	238
算符和超算符	238
经典的对易规则	240
量子的对易规则	241
结语	242
参考文献	244
译后记	251

序 言

本书是论述时间问题的。书名原打算定为《时间，被遗忘的维数》(*Time, the Forgotten Dimension*)，这样的书名可能会使一些读者感到奇怪，时间不是从一开始就结合到动力学，即运动的研究中去了吗？时间不就是狭义相对论讨论的重点吗？这当然是对的。但是，在动力学描述中，无论是经典力学的描述，还是量子力学的描述，引入时间的方式有很大的局限性，这表现在这些方程对于时间反演 $t \rightarrow -t$ 是不变的。诚然，在特殊类型的相互作用，即所谓超弱相互作用中，这种时间对称性似乎是破缺的，但这种破缺对于本书所要讨论的问题并不起作用。

时间在动力学中不过是作为一个“几何参数”出现，达朗贝尔早在 1754 年就已注意到这个特点(d'Alembert, 1754)。拉格朗日走得更远，他甚至把动力学叫作“四维几何”，这比爱因斯坦(Einstein)和闵可夫斯基(Minkowski)的工作早了一百多年(Lagrange, 1796)。按照这种观点，将来和过去起着同样的作用。组成我们宇宙的原子或粒子所沿着运动的“世界线”，也就是它们的轨道，即可以延伸到将来，也可以追踪到过去。

这种静止的世界观，其根源可以追溯到西方科学的发端时期(Sambursky, 1963)。米利都学派把所谓“原始物质”的思想和物质不灭定律联系在一起。在该学派最杰出的创始人之一泰勒(Thales)看来，由单一物质(如水)构成了原始物质，因而自然现象中的一切变化，例如生长和衰亡，就必然只是一些幻象而已。

物理学家和化学家都知道，过去和将来起着同样作用的描述，并不适用于所有现象。人人都会观察到，把两种液体放入同一容器里，一般都会扩散成某种均匀的混合物。在这个实验中，时间的方向就是关键性的。我们观察到一个逐渐均匀化的过程，这时，时间的单向性就是很显然的了，因为我们不会观察到两种混合在一起的液体能自发地分离。但是，这类现象很久以来都被排斥于物理学的基本描述之外。一切与时间方向有关的过程都被看作是一种特殊的，“不可几”的初始条件的效果。

我们在第一章中将会看到，本世纪初，这种静止的观点几乎为科学界一致接受。但从那时起，我们便朝着离开静止观点的方向发展了。一种动态的观点(时间在其中起着重要的作用)已在几乎所有的科学领域中盛行。进化的概念好象成了我们认识物质世界的核心。这个概念在十九世纪就完全形成了，值得注意的是，它几乎同时出现在物理学、生物学和社会学中，只是具有十分不同的特殊含义而已。在物理学中，它的引入是通过热力学第二定律，即著名的熵增加定律，这个定律是本书的主题之一。

按照经典看法，热力学第二定律表达了分子无序性的增加。正如玻耳兹曼(Boltzmann)所指出的，热力学平衡态相当于“概率”最大的态。但在生物学和社会学中，进化概念的基本含义正好相反，它描述向更高级别的复杂性的转变。在动力学中，时间被当作运动；在热力学中，时间与不可逆性联系在一起；在生物学和社会学中，时间作为历史，我们怎样把这些不同含义的时间相互联系起来呢？这显然不是一件轻而易举的事情。但是，我们生活在一个单一的世界之中。为了对我们居身的这个世界建立一个统一的观点，我们必须找到某种方法，使我们能够从一种描述过渡到另一种描

述。

本书的基本目的之一是向读者传达我的一个信念：我们正经历着一个科学革命的时期，这个时期涉及到重新估价科学方法的地位和意义，这个时期有些类似于古希腊科学方法的诞生以及伽利略时代的科学思想的复兴。

许多令人感兴趣的和十分重要的发现，扩大了我们的科学视野。这里仅举几例：基本粒子物理学中的夸克，天文学中像脉冲星那样的奇妙天体，分子生物学的惊人进展等。这些都是我们时代的里程碑，我们的时代是一个特别富于重要发现的时期。然而，当我说到科学革命的时候，我想到的却是另一些东西，也许是更难捉摸的一些东西。自从西方科学兴起以来，我们一直相信所谓微观世界——分子、原子、基本粒子的“简单性”。于是，不可逆性和进化就表现为一些幻象，这些幻象与自身简单的客体的集体行为所具有的复杂性联系在一起。这种简单性的概念在历史上曾经是西方科学的一个推动力，然而今天却很难再维持下去了。我们所熟悉的基本粒子，就是一些复杂的客体，它们既可产生，也会衰变。如果说物理学和化学中还存在简单性的话，那它不会存在于微观模型之中。它倒是可能存在于理想化的宏观模型中，例如谐振子或二体问题的简单运动模型。但是，如果我们用这些模型去描述大系统或非常小的系统的行为，这个简单性就会消失。只要我们不再相信微观世界的简单性，就必须重新估价时间所起的作用。于是我们就遇到了本书的主题，这个主题可以表述如下：

第一，不可逆过程和可逆过程一样实在，不可逆过程同我们不得不加在时间可逆定律上的某些附加近似并不相当。

第二，不可逆过程在物质世界中起着基本的建设性的作用；它们是一些重要的相干过程的基础，这些相干过程在生物学的水准上显现得特别清晰。

第三，不可逆性深深扎根于动力学中。人们可以说，在不可逆性开始的地方经典力学和量子力学的基本概念（如轨道或波函数）