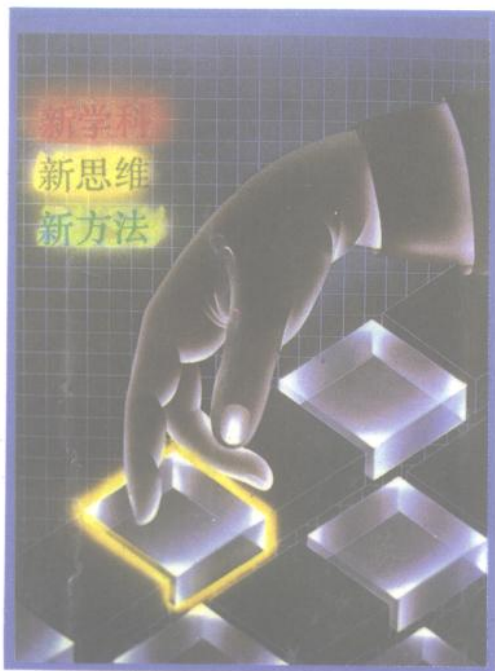


系统科学新论

超生
循命
环系
理统
论论

新学科
新思维
新方法



模耗
糊散
数结
学构

突变论协同学

華



系统科学新论

姜璐 王德胜 等编著

华夏出版社

1990年·北京

内 容 提 要

本书系统介绍了耗散结构、协同学、超循环理论、生命系统论、突变论、模糊数学的基本内容，分析研究了这些新学科的新思想、新观点、新方法。其中第一章“名家新论”的作者I·普利高津、H·哈肯、M·艾根、J·G·米勒，以巧妙通俗的文笔、简洁精采的手法，系统而扼要地介绍了他们所创立的理论，把这些理论的核心内容、基本思想、研究方法奉献给了读者。书中重点介绍了系统科学有关理论的原始内容，所以此书是一部“原汤原汁”式的著作，它不仅深入浅出地介绍理论本身，还探索了它们在各个领域的实际应用。阅读此书将是你掌握系统科学的捷径。本书为大专院校师生和科技工作者、哲学社会科学工作者，提供了一部有较高理论水平和实用价值的参考读物。

系 统 科 学 新 论

姜 翥 王德胜 等编著

华夏出版社出版发行

(北京东直门外香河园北里4号)

新华书店经销

文字六〇三厂印刷

850×1168毫米32开本 9.75印张 237千字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数 1—4200册

ISBN7—80053—724—2/Z·083

定价：6.50元

前 言

耗散结构、协同学、超循环理论、生命系统论等非平衡自组织理论,以及探索这些理论所用的突变论、模糊数学等数学工具,提出了一系列的新思想、新观点、新方法。这些新颖的科学思想和理论方法,已经引起广大自然科学家、社会学家、经济学家、哲学家、管理工作者、医学家、军事科学家以及未来学家的广泛兴趣。美国未来学家认为,这些新学科的发展,将会给 21 世纪的科学带来重大突破。为了让更多的人了解和掌握这些新学科,北京师范大学交叉学科研究会曾多次直接与创立这些新学科的名家 I·普利高津、H·哈肯、M·艾根、J·G·米勒等人进行交流与研究,同时还和国防科工委、中国科学院、北京大学、航天部等单位的有关同志共同进行过多方面的探索,并曾在北京师范大学部分本科生与研究生中试开过上述学科的有关课程。在 1988 年暑期,我们还主办了一个全国性的研究班。

在教学和研究当中,我们发现,国内外各行业尽管都对这些新理论感兴趣,但还没有把这些理论统一为一部著作,这对科研、教学和普及这些理论是很不利的。为了把这些新理论统一在一起,我们应华夏出版社廖国珍同志之邀,编写了这部小册子,希望能作为引玉之砖,系统、简明、全面、忠实地介绍这些理论及它们的应用。

这部书的出版,应当是北京师范大学交叉学科研究会集体努力的结果,请允许把本书的作者介绍给读者。

本书第一章名家新论中的外国专家是: I·普利高津、H·哈

肯、M·艾根、J·G·米勒。

其他各章作者，都是北京师范大学交叉学科研究会的成员：姜璐、王德胜、胡岗、陈永义、秦光戎、余玄水、狄增如、曾国屏、李克强等。

1988年10月各章完成初稿以后，由姜璐、王德胜统改定稿。

非平衡自组织理论，提出了一系列发人深省的新思想。在这些理论的研究中，揭示了决定论与非决定论、动力学规律与统计规律的深邃联系；同时，涉及到物质运动过程中对称与对称破缺、精确性与模糊性、有序和无序、可逆过程与不可逆过程的矛盾；这些理论还精采地体现了渐变和突变、平衡与不平衡、进化与退化、线性关系与非线性关系的辩证法，把对立的统一、量变与质变、否定之否定的规律生动而具体地展现在人们的面前。从哲学方法论的高度来看，耗散结构理论、协同学、超循环理论、生命系统论、突变论、模糊数学等新理论，是一部生动的辩证法的教科书，它们提出的认识论和方法论问题，必将启迪一代人的思考。

以非平衡自组织理论为前提，当前对混沌问题的研究，将会造成对牛顿力学的“第三次突破”，预示着一场科学技术大革命的出现。牛顿力学300多年来，已经经过了相对论力学向宇观高速运动的突破、量子力学向微观粒子运动方面的突破，当前对复杂性和混沌问题的研究，特别是对混沌区的内在随机性、奇异吸引子、无穷嵌套的自相似结构、分数维数等特性的研究，将会创造一系列的新方法，产生一系列新的科学思想。这些研究还会帮助人们解开复杂性之谜，对人们研究宇宙的起源、天体的演化、生命的进化、人类的出现等重大课题，都有实际意义。同时，对非平衡自组织过程和复杂性的探索，有可能帮助人们提高心理学研究水平，探明心灵的奥秘和大脑的“黑箱”；还可以启迪社会学家、经济学家探索社会运动和经济运动的规律，解开人类文化之谜。

城市和经济管理、人口问题和环境保护、国家政体和军事机

构、文学、艺术、体育等都涉及到复杂性问题,就连当前人们最关心的教育与科技问题也是一个复杂问题。因此,探索复杂性问题,涉及到自然、社会、思维的各个领域和角落,它将比牛顿力学、相对论力学、量子力学更深刻、更广泛、更普遍,所以这种研究将会对科学产生极为深远的影响。

非平衡自组织理论所研究的对象和所揭示的过程,具有很大的普遍性,因此,这种研究具有重大的哲学意义和深刻的认识论、方法论意义。所以,我们这本小册子也想作为一件礼物,献给我们的哲学家。我们想以此表示一种期望,期望当代中国哲学迅速走出“死亡谷”般的困境,迅速结束解释性的贫困状态,结束“对现代科学绕着走、对现实问题躲着走”的尴尬局面,真正作为时代精神的精华、现实文明的灵魂、打开智慧的钥匙,启迪和引导人们前进。

总之,耗散结构理论、协同学、超循环理论、突变理论、模糊数学、生命系统论等新学科,具有丰富的科学思想、崭新的研究方法,这些新学科将成为人类跨入未来社会的新里程碑。

作者 1988.11.15

于北京师范大学交叉学科研究会

目 录

前 言	(1)
第 一 章 名家新论	(1)
耗散结构新论.....I·普利高津	(1)
协同学基本思想和模型的应用	H·哈肯(16)
超循环	M·艾根(25)
生命系统理论及其应用	J·G·米勒(30)
第 二 章 非平衡热力学	(46)
第 三 章 耗散结构理论	(60)
第 四 章 耗散结构现象分析.....	(81)
第 五 章 协同学	(98)
第 六 章 化学振荡与对称性.....	(119)
第 七 章 超循环理论	(134)
第 八 章 混沌现象	(154)
第 九 章 突变论	(174)
第 十 章 模糊数学	(191)
第十一章 自组织理论在社会经济中的应用.....	(222)
第十二章 教育经济系统模型.....	(250)
第十三章 开放的非线性系统的相变实验.....	(266)
结 束 语	(303)

第一章 名家新论

布鲁塞尔学派的学术带头人 I·普里高津创立了耗散结构理论,并以此荣获了诺贝尔奖金。著名化学家、诺贝尔奖金获得者 M·艾根创立了超循环理论。另外,著名科学家 H·哈肯的协同学、J·G·米勒的生命系统论等都具有精深的科学思想和巨大而普遍的意义与现实价值。他们在这方面都有精深的论述,这些论述将可以有助于人们直接而准确地了解这些学科的内容和思想。

耗散结构新论

I·普利高津

经典观点认为,物理学、化学等学科所研究的简单系统,与生物学、人类科学等学科所研究的复杂系统有着明显的不同。确实,人们很难想象出有比气体或液体的简单行为与生命的演化更大的区别。现在,这个鸿沟正在被填平。在过去的 10 年中,我们提出的耗散结构理论指出,在非平衡的条件下,气体或液体这样的简单系统或简单的化学反应,能表现出非常复杂的行为。耗散结构理论开辟了将数学和物理学的知识应用于其它领域的通道,架设了软、硬科学之间的桥梁,使我们能够讨论自然科学在描述人类行为中的作用。

很明显,复杂系统动力学中所包含的概念,为认知科学的发展

提供了新的可能性。例如：

- 新信息的产生是分支、选择和稳定性的结果；
- 信息的选择和放大与神经网络的描述和人工智能问题有着紧密的联系。

昆虫世界的社会行为，从生态学的观点已经取得了很大的成功。现在，我们可以用同样的方法，从动力学的概念出发来讨论它。人们已经发现，在一个变化的环境中，在食物的采集和贮存等基本行为中，昆虫社会需要决定性和随机性两个组成部分，这就与学习行为、探险问题以及搜集行为中的随机现象有着紧密的联系。

在本文中，我们先回顾一下非平衡物理和动力系统方面的发展，首先我们讨论从上述角度将如何看待生命和宇宙；然后我们讨论与生命和宇宙的演化紧密相关的不可逆问题，它的微观内含人们已经争论了一百多年，现在可以简单、清楚地表述出来了。

1. 非平衡热力学和复杂系统

在 120 多年前(1865)，克劳修斯建立了热力学第二定律，引进了一个新的概念——熵。如果把宇宙看作一个孤立系统，由于不可逆和时间单向性，它的熵是增加的。在经典力学主宰的时代，这个结论是非常令人惊奇的。

从克劳修斯开始，物理学面临着两个时间概念：可重复的时间

和看起来正在逐渐衰减的时间。但它们都不能用来描述物理世界的复杂性，我们必须寻找第三个时间概念。

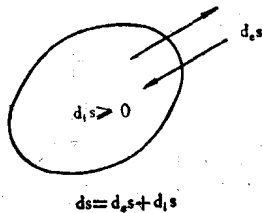


图 1—1—1 热力学第二定律

将系统的熵的变化 d_s 分成两部分： $d_e s$ 和 $d_i s$ 。 $d_e s$ 代表系统和它的环境之间的熵流，可正可负； $d_i s$ 代表系统

内部的熵产生，它总是正的（图 1-1-1）。对孤立系统， $ds = d_i s$ 是正的或零（图 1-1-2）。但开放系统会出现什么情况呢？

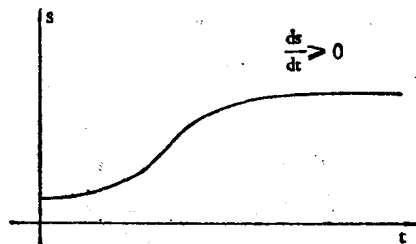


图 1-1-2 孤立系统的熵增加

热力学的最初的工作是与平衡态相联系的，一个处于平衡态的孤立系统是没有

时间箭头的。后来(1931)，翁萨格给出了非平衡热力学在近平衡区域的一般关系：系统对弱外界强迫作用的响应是线性的。这些线性的、可倒易的“流”和“力”之间的关系，使我们对非平衡系统的研究前进了一步，它把与最终状态相对应的平衡态的热力学势推广到了非平衡系统，得到了一个新的描述非平衡系统的势函数：熵产生。

现在让我们来考察系统在远离平衡条件下的非平衡热力学性质。此时，系统对外界环境的强约束的响应不再是线性的了，同时，它们表现出诸如分岔、滞后、多稳态等许多新的热力学性质。下面是两个非常典型的非平衡系统自组织行为的例子。

贝纳德不稳定性。给一个水平的液层加上一个垂直的温度梯度，并使下层的温度高于上层。对小的温度差，热量以热传导的方式传递，没有任何对流。但当温度梯度增大到一定临界值时，液层“静止”的定态变得不稳定了，与大量分子集体运动相对应的对流开始产生；在一定的条件下，这种对流形成复杂的空间自组织花样。

我们还可以从另外的途径来考察这一现象。在贝纳德系统中，包含两个因素：热流和重力。在平衡条件下，重力对 10mm 左右的液层简直不起什么作用；相反，在远离平衡时，重力成为产生宏观花样的决定性因素。非平衡条件下的系统比其处于平衡态时对外

界环境更为敏感,也可以这样说,平衡态时,系统是愚钝的;远离平衡时,系统变得聪颖。

另外一个例子是化学振荡。理想情况下,我们可以通过加入反应物、抽取生成物来控制一个化学反应的状态。假设参加反应的两个组分分别为一定量的红颜色和蓝颜色的分子,那么我们会观察到什么现象呢?在我们的想象中应该是在模糊不清的颜色中随机地点缀着一些蓝点和红点,但实际上并不是这样。在一系列这样的反应中,我们所观察到的是整个试管的颜色发生连续的变化,一会儿红,一会儿蓝,然后再变红,形成一个化学钟。

通常我们认为化学反应是由分子的无规则运动和碰撞产生的,但是,为了实现上面所提到的周期性变化,从某种意义上说,分子之间必须能够进行一定的联络。所以,在这里我们所遇到的是由化学反应产生的、在时间和空间上具有超分子水平的问题。

产生化学振荡的基本条件是自催化或互催化作用,这种作用会导致非线性行为。在现代生物化学中,这样的例子很多。例如,核酸产生蛋白质,而蛋白质又反过来导致核酸的形成,这里存在着一个包含蛋白质和核酸的互催化环。

非线性和远离平衡状态有着非常紧密的联系,它们的效果是导致多重稳定态(在近平衡情形下,我们仅能找到一个定态),这可以

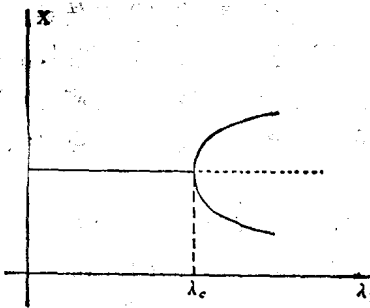


图 1-1-3 分支图

通过分支图来表示(图 1-1-3),图中 X 为问题的解,横轴 λ 为分支参数。当控制参数 λ 达到一个临界值 λ_c 时,新的解产生了,同时,在分支点附近,系统面临着对某个分支的选择。这是一种随机行为,所以,在分支点附近,涨落起着非常重

要的作用。

我们可以用吸引子的概念来描述耗散系统的行为，这一事实反应了它与力学的另一基本差别。假设一些外星体正在接近地球，这将引起地球轨道的变化，并且这一变化将永远维持下去，动力学体系不会遗忘微扰的情况。但当考虑耗散时，就不再是这种情形了。一个阻尼振子，当你撤消对它的初始扰动后，它总要达到一个平衡位置。

可以从更一般的意义上来考察系统远离平衡态时的行为。随着系统物质流和能量流的改变，决定系统近平衡行为的吸引子变得不稳定，更加复杂的、新类型的吸引子将会出现，赋予系统崭新的时空性质。可以说，非平衡为有序之源。

我们已经提到耗散系统可以遗忘初始扰动，系统的性质由吸引子来标志。图 1—1—4 和图 1—1—5 描述了两种最基本的吸引子。图 1—1—4 是二维相空间的一个点吸引子 P ，无论初始条件如何，系统将向 P 演化；图 1—1—5 是线吸引子，无论

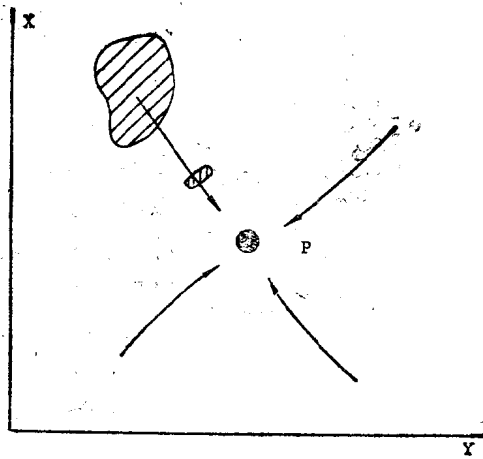


图 1—1—4 $X-Y$ 相空间中的点吸引子

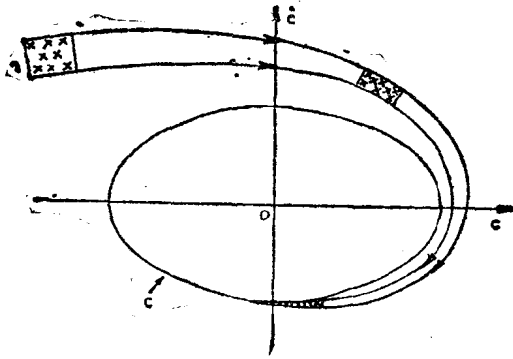
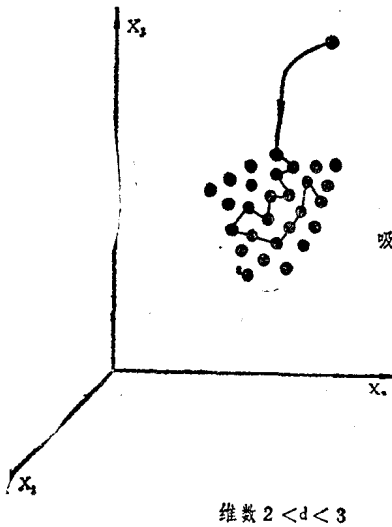


图1—1—5 极限环吸引子

初始条件如何,系统将最终演化到这条线上,这种线吸引子叫做极限环。

吸引子也可以有非常复杂的结构,图1—1—6的吸引子由



一系列点构成,这些点足够的密,以致可以构成一个非零维空间,例如图1—1—6的吸引子的维数可能是2和3之间的一个实数。按照B·马德尔考特的提法,这可以称做分形吸引子。具有这种吸引子的系统的行为,可以用新的非线性动力系统的定性理论来描述。考察图1—1—7所示的混沌吸引子中的轨迹,可以看到它沿一个方向收敛而沿另一个方向发散,这些性质分别由沿这

图1—1—6 空间吸引子

些方向的李雅普诺夫指数来描述。

这些系统具有共同的性质，其行为可以用我们平时实验中经常见到的湍流作代表，它们结合了涨落和稳定两种行为特征。系统被驱向吸引子，但由于吸引子由许许多多的点组成，

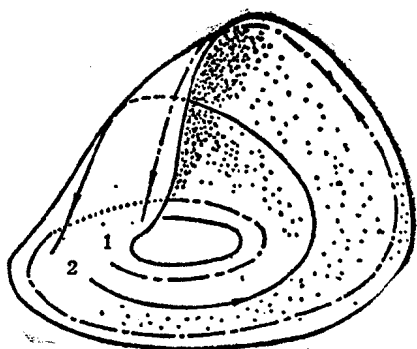


图1—1—7 Rössler模型的混沌吸引子

它又表现出很大的涨落行为，这通常称作吸引混沌。这种涨落与系统在吸引子内的初值敏感性密切相关，相邻轨道的间距随时间指数增长(这种增长由李雅普诺夫指数来表征)。吸引混沌现象已经在许多系统中观察到，其中包含化学系统和流体动力系统，但这些新概念的重要性已经远远超出物理学和化学的范围。下面我们列举一些最近研究的例子。

气候在过去的岁月里发生了剧烈的变化，2、3亿年前的气候条件与现在有着很大的不同。在第四纪(大约始于200万年前)以前时代里，大陆上没有水，海平面的高度也比现在高大约80米。第四纪的一个明显的特征，就是出现了一系列的冰川作用期；其平均周期大约为10万年，当然其中有着大量的背景噪声。这种剧烈涨落的原因是什么(图1—1—8)?没有明显的证据能说明太阳辐射的变化是它的直接原因。

G·尼科里斯夫妇最近的研究表明，这些涨落可以由4个不相关的变量来模拟，它们所形成的非线性动力系统，存在着一个嵌于4维相空间的3.1维的混沌吸引子。原先的理论认为，气候的变化是大量的因素以决定论形式相互作用的结果，如同统计物理中多粒子系统所表现出来的随机性一样。现在看来并不是这样，仅

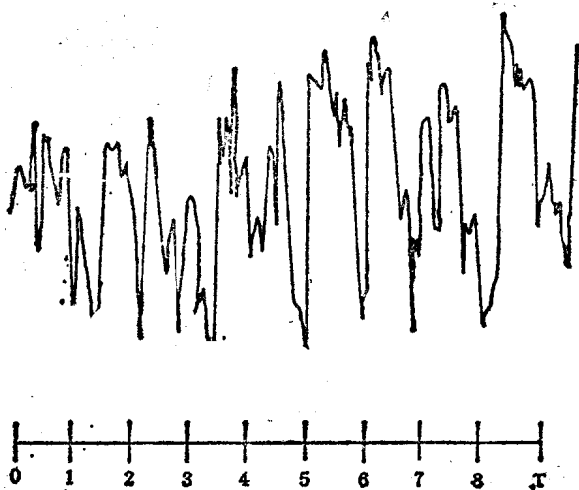


图1—1—8 地球气温在100万年间的变化

仅4个独立变量即可描述这样的复杂行为。可以说,气候具有内在复杂性或不可预测性。

总长 = 968×10^5 年

在另外一个领域中,最近的研究表明,由脑电图仪监测的大脑在深度睡眠过程中的脑行为,可以用一个分形吸引子来描述。深度睡眠脑电图模型是一个包含5个变量的非线性动力系统,同样,这也说明大脑做为一个系统具有内在复杂性和不可预测性。

正是这种不稳定性使我们能够将弱的、与感知相联系的输入信号加以放大。显然,人类大脑的动力学复杂性并不是偶然的,它必然是由于它的极端不稳定性而在进化过程中被选择和发展。动力学不稳定性是人类生存、创造力特征的基本组成部分。人们自然想到,难道生物进化是动力学不稳定性的历史吗?

2. 生物学和宇宙学中的不可逆性与信息

生命和宇宙的起源问题一直激发着人类的想象力。

在这两个问题中，不可逆过程起着重要的作用，也可以这样说，时间在宇宙的最初岁月里，在由基本生化组份如 DNA 所携带的信息的产生过程中，进入到物质之中。

确实，生物分子的基本特征就是它携带着大量的信息。这些信息必须从某一个方向读，非常类似于我们的课本。从这种意义上说，生化分子是对称破缺的，我们会很自然地把这种对称破缺与热力学第二定律所表述的时间的对称性破缺联系起来。我们已经看到，在贝纳德不稳定性中，不可逆性转化为模式，但这种模式仅仅当液层中存在热流时才能维持。相反，生命从 34 亿年前起源开始，就具有强大的持久性。

生命起源中一个基本的问题就是如何看待核酸序列的选择。假设一个蛋白质由 100 个氨基酸组成，大家都知道，自然界中存在着 20 种氨基酸，所以共有 20^{100} 个可能的序列。非平衡条件能够减少这些序列的数目，因为我们必须使序列与一定的信息相联系，这就排除了完全随机的序列，因为周期序列可以被压缩成几个符号，因此也被排除，用信息论的概念来说，我们需要的是不可压缩的信息。

最近对混沌化学反应的研究，为我们提供了一个描述不可逆性的非常简单的模型。按照 G·尼科里斯和 G·舒巴尧的工作，我们考虑包含 3 个化学组分的化学反应。3 个组分分别记为 X_1 、 X_2 和 X_3 ，假定当其中任意一个组分的浓度超过某个临界值时，相应组分的分子就生成某个聚合物(图 1—1—9)，结果是我们得到了一个确实携带不可压缩信息的序列。

显然，存在极限环的反应，相应的序列仅携带可压缩的信息。如上例中我们只能得到形如 $xyz\ xyz\ xyz$ 的周期链，而对混沌反应生成的序列，当我们沿着一个方向去读时，对应着一个马尔可夫链，不可逆性形成了一个课本。这是一个简化的模型，但不难看出，在真实世界中，可以在远离平衡的条件下，通过从热力学分支

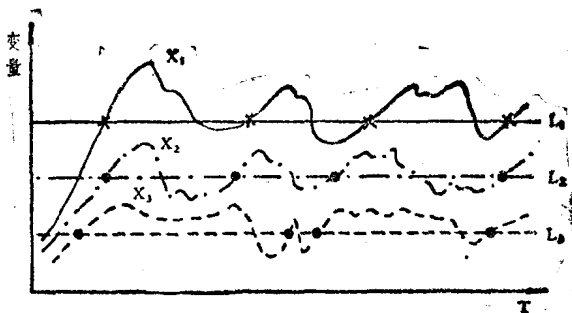


图 1—1—9 混沌行为的编码形成一个不可压缩信息

的分岔行为产生聚合物。所以，我们有可能找到一些携带信息的分子，而它们恰恰是今天的生物分子的祖先。在这里，我们想要强调的最重要的一点就是，非平衡过程和混沌动力行为确实能够产生信息。

以上我们讨论了生命起源的一些问题。在所有起源问题中，最引人注目的还是宇宙的起源问题，宇宙学的研究历史是最富有戏剧性的。大家都知道，爱因斯坦在 1917 年提出了一个静止的宇宙模型，他的最终成果是广义相对论。广义相对论给出了时间、空间和引力的统一性，但这个静止的模型很快就被放弃了。1922 年，费尔德曼指出爱因斯坦方程是不稳定的。胡伯利的观测结果也表明，从演化的角度看，宇宙是不断膨胀的。后来，黑体辐射表明，除了这种几何上的演化外，还有更基本的热力学演化。

我们来考察一下标准的现代宇宙学观点(图 1—1—10)。它有两个基本论点：当趋于大爆炸开始那一点时宇宙的温度是单调增加的；同时，由于宇宙的演化是在绝热的情况下进行的，它的熵应保持不变。我们不可能讲得很细致，但这里已经包含两个很明显的问题：宇宙是如何从如此之高的温度中创生的？熵是如何一下子达到这样一个不变的水平？