

SYNERGETICS

协同学导论

H.哈肯 著
张纪岳 译
郭治安 校
江仁寿 校

西北大学科研处

1981

协同学导论

H.哈肯 著
张纪岳 译
郭治安
江仁寿 校

西北大学科研处

1981

H. Haken

Synergetics—An Introduction

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1977

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了开放系统非平衡有序结构形成的条件、特性及其基本原理。全书共分十二章：前七章深入浅出地介绍了有关的数学和物理基础知识，从第八章开始，以物理学、流体动力学、化学、生物学、生态学和社会学等学科作为具体对象，应用前面的基础理论作非平衡有序结构的阐述。

本书可作为大专院校物理系、化学系和生物系等专业学生的参考书，可供大专院校有关专业教师、研究生参考，亦可供其它有关专业的科技工作者、工程师参考。

本书由西北大学张纪岳和大连铁道学院郭治安翻译，由西北大学江仁寿校阅。

协同学导论

〔西德〕H.哈肯著

张纪岳 译
郭治安
江仁寿 校

西北大学科研处

1981

中译本前言

西德著名的物理学家哈肯(H.Haken)所创始的这门新兴的学科——协同学(Synergetics),近年来发展巨大,其应用之广,在科学史上罕有其匹。在物理学、化学和生物学等自然科学中,协同学指出了新方向,所得结果辉煌灿烂;即使在社会科学中,一经应用,亦显示出了柳暗花明,别开生面。

这门学科,在我国还属婴孩。可是,其成长并不慢。在1980年全国非平衡统计物理(大连)会议上,曾有较系统的介绍;当时,为了便于讨论,哈肯的这本专著,曾由西北大学张纪岳和大连铁道学院郭治安二同志译出,油印分发。后来,又经过译者仔细修改。

最近一段时间,西北大学经济系胡传机和物理系张纪岳等同志尝试着把协同学和经济学结合起来,写成了一组文章,得到了有关专家的好评;并认为这是一个良好的开端,希望将来能结出更多的成果来。这一工作取得了初步成就,这是与西北大学校领导和科研处的大力支持分不开的。

此书出版,得到国内很多专家、学者的关心和支持,特别是北京大学王竹溪教授的多方鼓励和热情帮助。我们在此一并感谢。

自然科学与社会科学之间相隔如山,鸿沟万里,由来久矣。沟而通之,隧而相见,当今之世,哈肯此书,最为完美。

让我们引本书跋中哈肯的一段话来作为结束语吧。

哈肯说:“协同学是一门十分年幼的学科,很多奇突的结果还在我们的前头哩。我希望我所写的这本书,对读者有所激发,能使他们在自组织系统的性质上作出自己的发现。”

这是作者写此书的心愿,也是译者译此书的心愿。

西北大学 江仁寿

1981. 4.

序

从微生物甚至从混沌态而自发形成的很有组织的结构，乃是科学家们所面临的最吸引人的现象和最富于挑战性的问题之一。当我们观察动物和植物的生长时，我们在日常生活中所感受到的就是这类现象。当考察的时间尺度非常巨大时，科学家们就提出了生命物质的演化以至起源问题。当着人们要想在某种意义上解释或者了解这些非常复杂的生物学现象时，很自然的一个问题就是，自组织过程能否在非常简单的无机系统中找到。

近几年来，在物理学和化学系统中存在着来自混沌态的很有组织的时间、空间或时-空结构的例子，已越来越明显了。而且，正如在有生命的有机体中一样，只有在有能量和物质通量通过其中时才能够维持这些系统的功能。人造机器的设计在于表现特殊的结构和功能，但与人造机器相反，这些结构是自发地、自组织起来的。当许多系统从无序到有序时，它们呈现出非常相似的行为，这一点对很多科学家来说是很惊奇的。这就有力地表明了这类系统的功能遵从着相同的基本原理。在本书中，我们打算解释这些基本原理、基本概念，并介绍必要的数学工具。

本书准备为物理学、化学和生物学学生们学习这些原理和方法的一本教科书。我尽可能以初等形式的数学说明，因此，大学微积分课程的知识应该是足够的了。当今许多重要的数学结果都被复杂的术语所淹没。虽然必须用到专门的符号，但我还是尽量地避免使用。在引入这些符号时，我都要给予说明。好在这些方法，不仅在自组织系统中可以用，而且在其它的问题中也可以用。为了使本教程自成体系，我还增加了一些章节，阅读这些章节时，读者需具有一些更难的或更高深的数学基础。这些章节都用星号标出，其中一些章节已引用到了最新成果。因此，它们对研究工作者可能有所补益。

一般来说，所需的物理学、化学和生物学系统之基础知识并不太专门。相应的章节是这样安排的，这些学科的学生只需阅读与之有关的章节。不过，最好还是浏览一下其它的章节，这样一来，就会觉得所有这些系统彼此之间是多么的相似。我把这一学科叫做“协同学”。为了在宏观尺度上产生结构和功能，我们所研究的系统是许多子系统（多半是相同的或者只有几种不同的子系统）联合作用的系统。另一方面，许多不同学科的合作，就会找出制约自组织系统的一般原理。

我要感谢斯普灵格出版公司的洛希(Lotsh)博士，他建议我把在现代物理评论(1975)上发表的文章——“远离平衡系统和非物理学系统中的合作现象”扩充改写一下。在扩充改写期间，终于逐渐形成了一个全新的初稿。我希望这一领域尤其为物理学、化学和生物学的学生们所接受。在某种程度上，本书和我前面的文章是互相补充的。非常感谢我的同事们和朋友们，特别是韦德里希(W. Weidlich)教授多年来的富有成效的讨论。我的秘书丰克(U. Funke)夫人和我的合作者翁德林(A. Wunderlin)博士给我写这本书以很

多的帮助，我对他们表示深切的感谢。翁德林博士十分仔细地校对了公式，重新计算了许多公式，准备了许多图，并对如何改进原稿提出了很有价值的建议。尽管丰克夫人有繁忙的事务工作，但她还是十分精致地绘制了大多数的图，写了一些原稿的修改稿（包括公式在内）。她的乐于助人和不辞辛劳的努力，不断地鼓舞着我去完成这本书。

赫曼·哈肯

(*Hermann Haken*)

1976年11月 于斯图加德

目 录

第一章 目 的

- 1. 1 有序和无序：一些典型现象····· (1)
- 1. 2 一些典型的问题与困难····· (9)
- 1. 3 从何处着手····· (11)

第二章 概 率

- 2. 1 我们的研究对象：取样空间····· (13)
- 2. 2 无规变量····· (15)
- 2. 3 概率····· (16)
- 2. 4 分布····· (17)
- 2. 5 连续无规变量····· (19)
- 2. 6 联合概率····· (21)
- 2. 7 数学期望 $E(x)$ 和矩····· (23)
- 2. 8 条件概率····· (23)
- 2. 9 独立和相关无规变量····· (24)
- 2. 10* 生成函数和特征函数····· (26)
- 2. 11 特殊概率分布：二项式分布····· (27)
- 2. 12 泊松分布····· (29)
- 2. 13 正态分布（高斯分布）····· (30)
- 2. 14 斯特灵公式····· (32)
- 2. 15* 中心极限定理····· (32)

第三章 信 息

- 3. 1 一些基本概念····· (34)
- 3. 2* 信息增益：一个说明性的推导····· (38)
- 3. 3 信息熵和约束····· (39)
- 3. 4 物理学的例子：热力学····· (43)
- 3. 5* 不可逆热力学入门····· (46)
- 3. 6 熵——统计力学的灾难吗？····· (53)

第四章 偶然性

- 4. 1 布朗运动的模型····· (55)
- 4. 2 无规行走模型及其主方程····· (60)
- 4. 3* 联合概率与路径、马尔可夫过程，卡卜曼—哥尔莫哥洛夫方程，
路径积分····· (64)

4. 4*	如何用联合概率、矩、特征函数、高斯过程	(68)
4. 5	主方程	(70)
4. 6	细致平衡下系统主方程的严格定态解	(72)
4. 7*	细致平衡下的主方程, 对称化, 本征值和本征态	(74)
4. 8*	求解主方程的克希荷夫方法	(77)
4. 9*	有关求解主方程的几个定理	(79)
4. 10	无规过程的意义、定态、涨落、回归时间	(80)
4. 11*	主方程与不可逆热力学的极限	(83)
第五章 必然性		
5. 1	动力学过程	(85)
5. 2*	临介点和相平面上的轨道, 二次极限环	(91)
5. 3*	稳定性	(97)
5. 4	关于二分支与稳定性的例子和练习	(102)
5. 5*	静不稳定性的分类, 或托姆突变论的初等方法	(107)
第六章 偶然性与必然性		
6. 1	朗兹万方程: 例子	(117)
6. 2*	热源和无规力	(121)
6. 3	福克—普朗克方程	(127)
6. 4	福克—普朗克方程的一些性质和定态解	(133)
6. 5	福克—普朗克方程的含时解	(138)
6. 6*	用路径积分解福克—普朗克方程	(142)
6. 7	相变类比	(145)
6. 8	连续介质中的相变类比: 含坐标的序参量	(151)
第七章 自组织		
7. 1	组织	(155)
7. 2	自组织	(158)
7. 3	涨落的作用: 可靠性还是适应性? 开关作用	(163)
7. 4*	福克—普朗克方程中快弛豫参量的绝热消去	(165)
7. 5*	主方程中快弛豫参量的绝热消去	(167)
7. 6	连续介质中的自组织, 数学方法概述	(168)
7. 7*	非平衡相变的广义金兹保—朗道方程	(168)
7. 8*	广义金兹保—朗道方程的高阶贡献	(175)
7. 9*	连续的非平衡系统的标度理论	(178)
7. 10*	软模不稳定性	(180)
7. 11*	硬模不稳定性	(184)
第八章 物理学系统		
8. 1	激光中的合作效应: 自组织与相变	(186)
8. 2	模式表象中的激光方程	(186)

8. 3	序参量概念	(188)
8. 4	单模激光	(188)
8. 5	多模激光	(192)
8. 6	连续多模激光, 与超导性的类比	(193)
8. 7	单模激光的一级相变	(196)
8. 8	激光不稳定性的层次和超短激光脉冲	(199)
8. 9	流体动力学中的不稳定性: 贝纳问题和台劳问题	(203)
8. 10	基本方程	(204)
8. 11	阻尼与随遇解 ($R \leq R_c$)	(205)
8. 12	近 $R = R_c$ 解 (非线性区)。有效朗兹万方程	(206)
8. 13	福克—普朗克方程及其定态解	(208)
8. 14	近阈值耿氏不稳定性的统计动力学模型	(211)
8. 15	弹性稳定性: 一些基本概念的概述	(215)
第九章 化学和生物化学系统		
9. 1	化学和生化反应	(218)
9. 2	确定的过程, 无扩散, 单变量	(218)
9. 3	反应和扩散方程	(222)
9. 4	双变量或三变量的反应扩散模型: 布鲁塞尔机 (Brusselator) 和俄勒哥恩机 (Oregonator)	(224)
9. 5	无扩散的化学反应的随机模型, 生灭过程, 单变量	(230)
9. 6	有扩散的化学反应的随机模型, 单变量	(234)
9. 7*	布鲁塞尔机在接近软模不稳定性时的随机处理	(237)
9. 8	化学网络	(241)
第十章 对生物学的应用		
10. 1	生态学、群体动力学	(243)
10. 2	一个捕食者与被捕食者系统的随机模型	(246)
10. 3	进化过程的简单数学模型	(247)
10. 4	形态形成的模型	(248)
第十一章 社会学: 舆论形成的随机模型		
第十二章 历史的回顾与展望		
		(253)

第一章 目的

你为何要读这本书

1.1 有序和无序：一些典型现象

让我们从日常生活中所观察到的一些典型现象开始吧。当我们把一个冷的物体与一个热的物体相接触时，这两个物体就要交换热量，直到二者具有相同的温度为止（图1.1）。此时，该系统至少在宏观上已变成一个完全均匀的系统了。但是，在自然界中从未见过相反的过程。因此，过程的进行具有唯一的方向性。



图1.1 不可逆的热交换

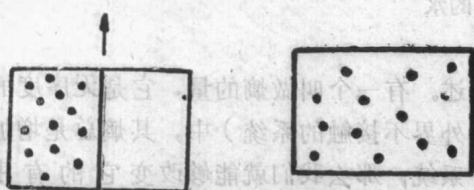


图1.2 不可逆的气体膨胀



图1.3 墨水滴在水中的扩散

当我们把一个充满气体原子的容器的活门打开时，气体就会充满整个容器（图1.2），相反的过程决不会出现。气体本自是不会再收缩到恰好是容器的一半的容积里去的。当我们把一滴墨水滴入水中时，墨水就会逐渐散开，直至达到均匀分布为止（图1.3）。相反

的过程从未见到过。当一架飞机用烟在空中写字时，字母就会逐渐模糊并消失（图1.4）。在所有这些情形下，系统都要发展到一个唯一的末态，叫做热平衡态。原有的结构消失了，代之以一个均匀的系统。当从原子、分子运动的微观角度来分析这些现象时，我们发现其无序度都增加了。

让我们以能量损失的例子来作为结束吧。考察一个发动机关闭后运动着的汽车，从物理学家的观点来看，它是一个在单一自由度上具有一定的动能的系统（在一个方向上运动），该动能被摩擦所消耗，把能量变为热（使轮子变热等）。而热就意味着许多粒子的运动，所以单一自由度的运动已分配到许多自由度上去了。另一方面，显然，只加热轮子是不会使车辆开动起来的。

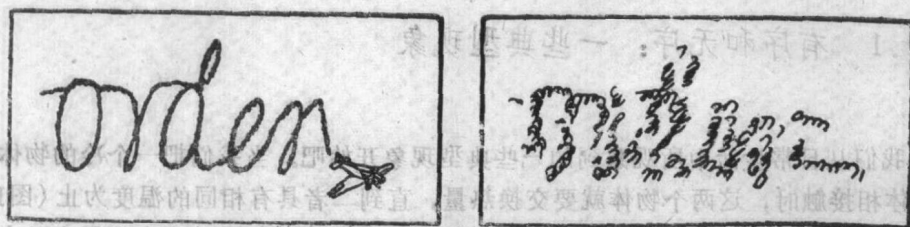


图1.4 烟的扩散

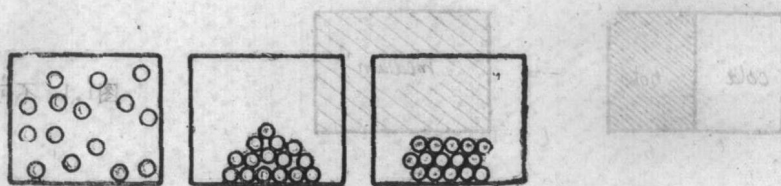


图1.5 处于不同相中的水

在热力学范围内，对这些现象已作了专门的描述。有一个叫做熵的量，它是无序度的量度。热力学定律说：在一个封闭系统（即一个与外界不接触的系统）中，其熵总是增加到极大值。另一方面，如果我们从外界来控制一个系统，那么我们就能够改变它的有序度。例如，考察水汽（图1.5）。在高温下，水分子互不关连地自由运动；若降低其温度，就会形成液滴。这时，分子之间保持着一个平均距离，从而它们的运动是高度相关的。最后，继续降低温度到凝固点时，水就变成为冰。这时，水分子以一定的次序规则地排列着。在不同的聚集态（也叫做相）之间的转变是突变的。虽然一直都是同一种分子，然而这三个相的宏观性质却是截然不同的。显然，它们的力学、光学、电学和热学性质是大不一样的。

在铁磁体中出现了另一种类型的有序（即罗盘的磁针）。若把一块磁铁加热，它就会突然失去其磁性；但若降低其温度，则它又会突然重新获得磁性（图1.6）。

在微观的原子水平上所发生的事情是：我们可以把磁体想象为是由许多磁体（叫做自旋）组成的。在高温下，各个元磁体的指向是无规的（图1.7），当把它们的磁相加时，

就互相抵消而不呈现宏观磁性。在临界温度 T_c 以下元磁体就排列起来，从而就产生了宏观磁性。因之，微观上的有序是材料在宏观上具有新特点的一个原因。从一个相到另一个相的转变叫做相变。在超导体中也观察到了非常类似的相变，在某些金属和合金中，在某一温度下，其电阻突然地完全变为零（图1.8），这一现象是由于金属电子的一定的序所产生的。这类相变的例子还很多，它们常常呈现出惊人的相似。

尽管这是一个十分有趣的研究领域，但要解释任何生物学过程时，它并不能给我们提供线索。在这里，有序和特定的功能是不能靠降低温度来得到的，而是靠通过系统的能量和物质的流量来维持的。在其它许多情况下所发生的事情是：能量以化学能的形式馈送给系统，其中包含了许多微观步骤，最后终于在宏观尺度上导致有序现象，形成花样（形态形成），移动（即少数自由度！）等等。

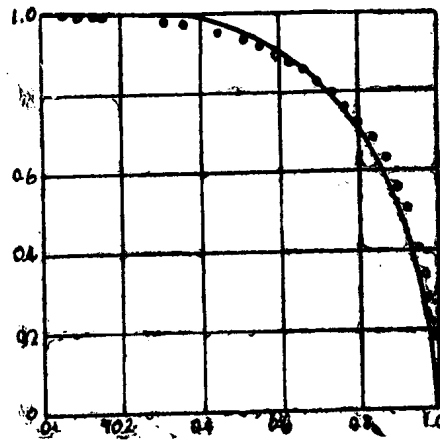


图1.6 铁磁体的磁化与温度的关系

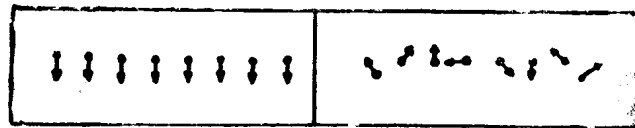


图1.7 无规指向的元磁体 ($T > T_c$) (左边)；规则排列的元磁体 ($T < T_c$) (右边)。

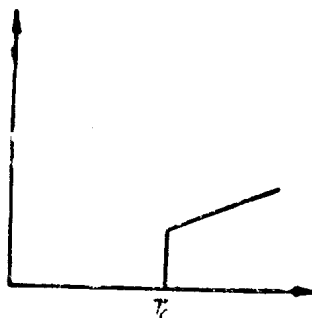


图1.8 超导体的电阻与温度的关系

我们用上面所提到的物理学现象和热力学定律，来解释生物学现象的可能性，尤其是从混沌态产生宏观序，似乎是颇无希望的了。这已经使得那些杰出的科学家都认为，这种解释是不可能的。然而，我们不要因一些作者的意见而灰心丧气，还是让我们以不同的观点来重新考察这个问题吧。汽车的例子就告诉我们，能量从多个自由度集中到单个自由度是可能的，在汽车发动机中，汽油的化学能实际是先转化为热，然后汽缸中的活塞在规定的单一方向上完成了能量从多个自由度到单个自由度的集中。在这里，要记住两个重要的事实：

- 1) 整个过程是通过人造机器成为可能的，在其中，我们已给定一个约束；
- 2) 我们从远离热平衡开始，实际上，推动活塞就相当于在给定的约束下达到热平衡。

反对把这个机器作为生物学系统模型的事实是，生物学系统是自组织的，而不是人造的。这就给我们提出了一个问题，我们能否在自然界中找到一些系统，它在自然约束的作用下，运转在远离平衡的情况，这类系统，有些只是在最近才发现，而另一些则早就知道了。我们描述几个典型的例子：

处于自然系统与人造装置之间的一个系统就是激光。在这里我们把激光当作一个器件来处理，但是在星际空间已经发生了激光作用（在微波区）。我们以固体激光器为例来说明，它是由一个在其内部掺有特定原子的棒状材料所组成（图1.9）。通常，反射镜就固定在该棒的两个端面上，每个原子都可从外界激发，如被光的辐照所激发，然后原子作为一个微观天线发射光波列。在经典情况下，这一发射过程持续 10^{-8} 秒，而波列就有三米之长。反射镜是用于选择波列的，它使得那些在轴线方向上传播的波列能够在两反射镜之间来回反射多次，并能在激光器中停留较长的时间，而其它的波列则很快就离开了激光器（图1.10）。若我们开始把能量泵浦到激光器中去，那就会发生如下的情况：在小的泵浦

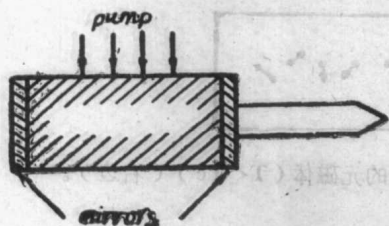


图1.9 激光器的典型装置

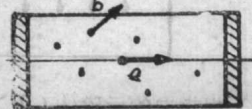


图1.10 在轴向上发射的光子(a)在腔内的寿命 t 。比所有其它光子(b)的寿命都长。

功率下，激光器就象一只灯一样地运转，原子天线彼此独立地（即无规地）发射光波列。但当泵浦功率达到某一阈值时，就出现了全新的现象，好象有一个魔鬼使得原子天线同相振荡。此时，发射出单色的大波列，其长度比方说是30万公里（图1.11）：发射的光强（即输出功率）随输入功率的增加而急剧增加（图1.12）。显然，激光宏观性质的剧烈变化就使人联想起铁磁相变的情况。

正如在本书的后面我们将会看到的那样，这种类比还具有更为深远的意义。显然，激光是一个远离平衡的系统。当泵浦能量进入该系统时，它就变为具有独特性质的激光，随

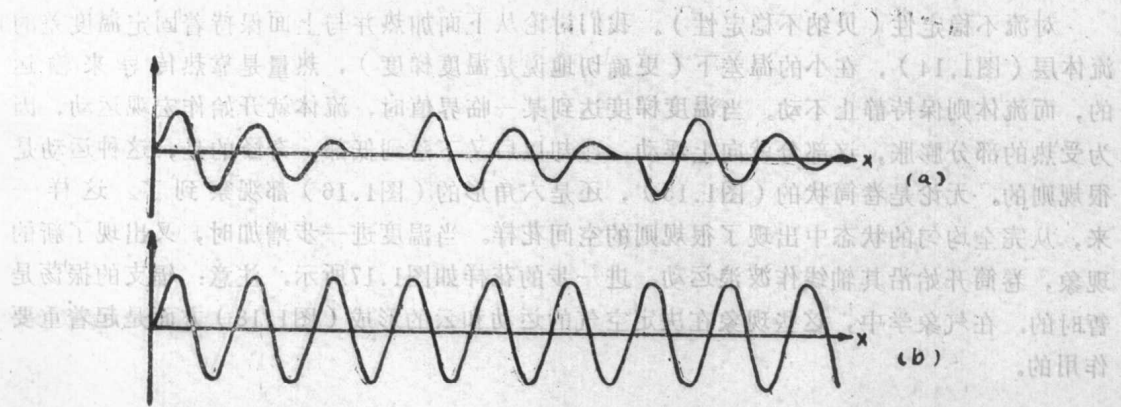


图1.11 (a)灯发射的波列 (b)激光器发射的波列

后，激光就离开了激光器。很明显的一个问题是，是什么力量（魔鬼）使得这些子系统（即原子）以这样好的组织动作起来呢？或者说，用更科学的语言讲，用什么机制或原理能够解释原子（或原子天线）的自组织呢？若继续把激光器向更高水平泵浦，则突然地又出现了一个全新的现象，棒规则地发射时间极短的脉冲，比如说 10^{-12} 秒。作为第二个例子，我们来考察一下流体动力学，或者更具体地说，是流体绕圆柱体的流动。在低速下，流动图形如图1.13 (a)所示；在高速下，突然出现了一个新的静态花样：一对涡旋 (b)。随着流速的不断增高，出现了动态花样，此时涡旋在振荡 (c)。最后，在更高的速度下，出现了叫做湍流的不规则花样 (e)。尽管在本书中不会处理这种情况，我们在下面还要作一介绍。

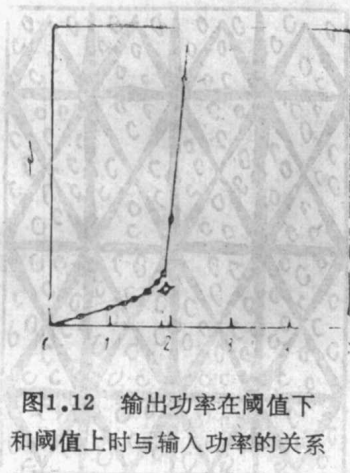


图1.12 输出功率在阈值下和阈值上时与输入功率的关系

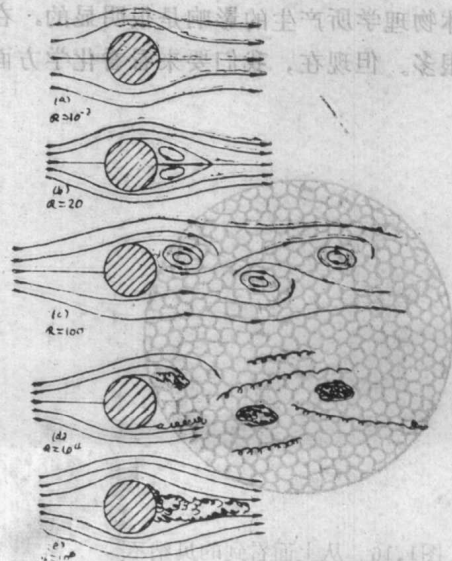


图1.13 流体以不同的流速绕圆柱体的流动

对流不稳定性(贝纳不稳定性)。我们讨论从下面加热并与上面保持着固定温度差的流体层(图1.14), 在小的温差下(更确切地说是温度梯度), 热量是靠热传导来运输的, 而流体则保持静止不动。当温度梯度达到某一临界值时, 流体就开始作宏观运动, 因为受热的部分膨胀, 这部分就向上浮动, 冷却以后又下落到底部, 奇怪的是, 这种运动是很规则的。无论是卷筒状的(图1.15), 还是六角形的(图1.16)都观察到了。这样一来, 从完全均匀的状态中出现了很规则的空间花样。当温度进一步增加时, 又出现了新的现象, 卷筒开始沿其轴线作波浪运动。进一步的花样如图1.17所示。注意: 辐支的振荡是暂时的。在气象学中, 这些现象在决定空气的运动和云的形成(图1.18)方面是起着重要作用的。



图1.14 从下面加热的流层, 在小的瑞利数时热量是靠热传导来运输的

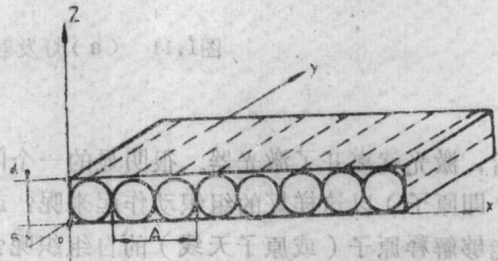


图1.15 在比临界值稍大一些的瑞利数时, 液体以滚动的形式运动

一个密切相关的现象就是台劳不稳定性。在这里, 流体被放置在两个共轴转动的圆筒之间。在临界转速以上, 出现了台劳涡旋, 在进一步的实验中又把转动的圆筒之一加热。因为在有些情况下, 可以把星球视为具有热梯度的转动着的流体物质, 所以这些有效效应对天体物理学所产生的影响是很明显的。在远离热平衡的物理系统中, 这类有序现象的例子还很多。但现在, 我们要来看看化学方面的例子。

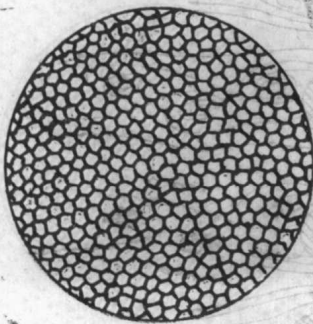


图1.16 从上面看到的贝纳不稳定性蜂窝状结构

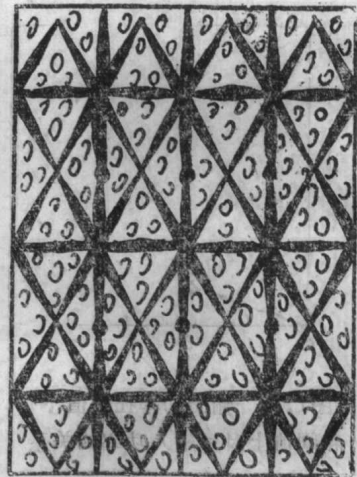


图1.17 在高瑞利数时的流动花样

在若干化学反应中，出现了时间、空间或时一空花样。Belousov—Zhabotinsky 反应提供了一个例子，在这里， $\text{Ge}_2(\text{SO}_4)_3$ ， KBrO_3 ， $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$ ， H_2SO_4 以及几滴 Ferroine（氧化还原指示剂）相混合并搅拌，然后将所得到的均匀混合物倒入试管中，在试管里立刻就出现了时间振荡，溶液的颜色周期地由红（指示 Ce^{3+} 过多）变蓝（指示 Ce^{4+} 过多）（图1.19）。

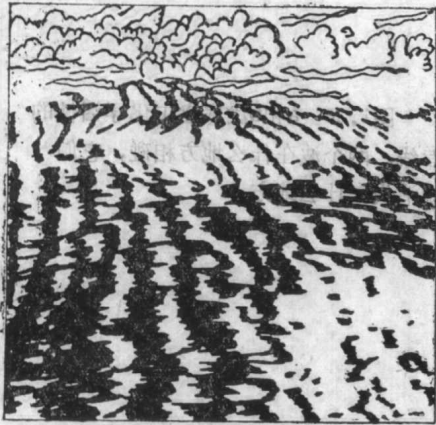


图1.18 云道的典型花样

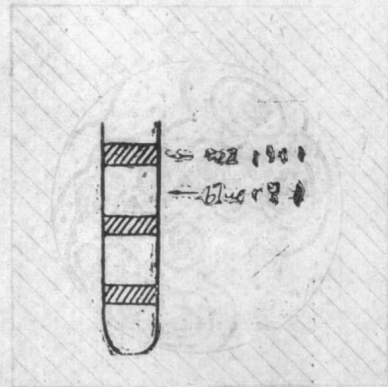


图1.19 显示空间花样的
Belousov—Zhabotinsky反应

由于反应是在封闭系统中进行的，所以系统最终达到均匀平衡。图1.20中表示了建立化学结构的其它的例子。在本书后面的章节中，我们要处理定态条件下的化学反应，而且此时出现了时-空振荡。原来，所出现的这些结构遵从类似于激光、流体动力学和其它系统的有序-无序转变所遵从的原理。

最后，让我们看一下生物学方面的例子。在很不相同的层次上，观察到了明显的自发形成的结构。在地球的层次上，我们见到了各种各样的物种。决定其分布和丰度的因素是什么呢？为了表明我们所观察到的与什么有关，我们来考察图1.21。图上实际存在着野兔和山猫的雪迹数的时间振荡。引起振荡的机制是什么呢？在演化中，选择起着基本的作用，我们将会找到物种的选择遵从与激光模式同样的规律。

请看最后一个例子。在生理学的发展中，早已知道一组相同的细胞可以自组织成为具有确定边界的结构。由细胞组成的盘基网柄菌 (*Dictyostelium discoideum*) 的聚集，可作为在胚胎起源中细胞相互作用的模型。灰原菌 (*Dictyostelium*) 由单细胞聚集而成一个多细胞组织，在其生长阶段，组织以单一的变形细胞的形态存在，生长结束后几小

时，这些细胞就形成一个极性物。沿着极性物，它们分化为其它的孢子或主茎细胞——组成果实的最后型式。单细胞能够以脉冲的形式在它的周围自发地发射一种叫做 cAMP (Cyclic Adenosin3'5' Monophosphate) 的分子；细胞还能够放大cAMP脉冲。这样一来，细胞就完成了化学的自发发射和受激发射（类似于激光原子对光的自发发射和受激发射）。这就导致化学脉冲的集中发射，该脉冲以浓度波的形式从产生cAMP的浓度梯度中心徙动。单细胞可以测量梯度的方向和借助于假足向中心的徙动。所得到的宏观波形图样（卷线或同心圆）描绘在图1.22中，且与描绘在图1.20中的化学浓度波非常相似。

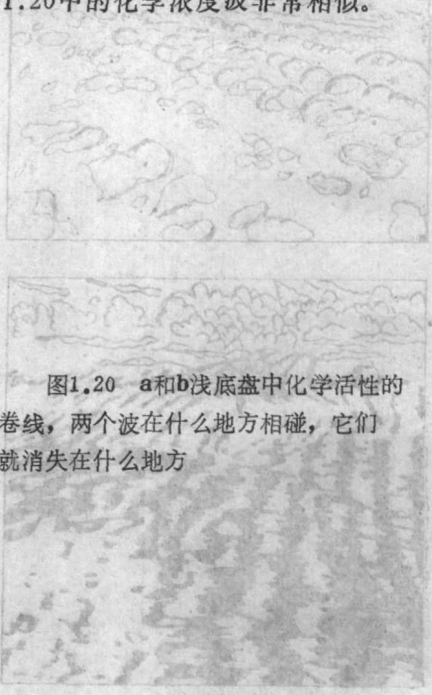
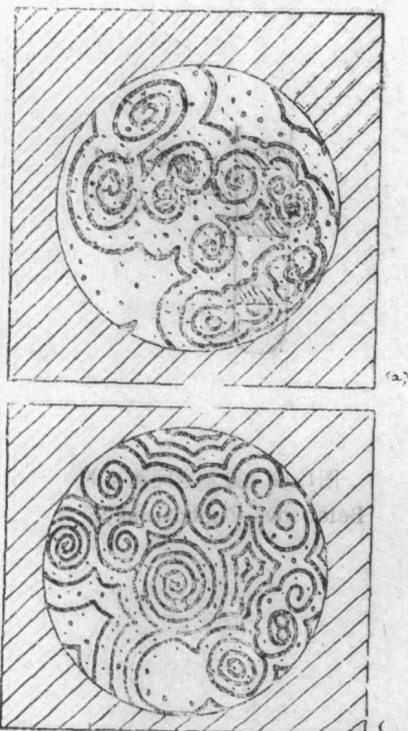


图1.20 a和b浅底盘中化学活性的卷线，两个波在什么地方相碰，它们就消失在什么地方

立数气示美中05:1图，调平区以假衣共社德系以测，消行抵中德系因特亦量宿风十由且而，直另等)的才并系态家取似要口非，中草章前而司并本分，干网始守其由研辞学外

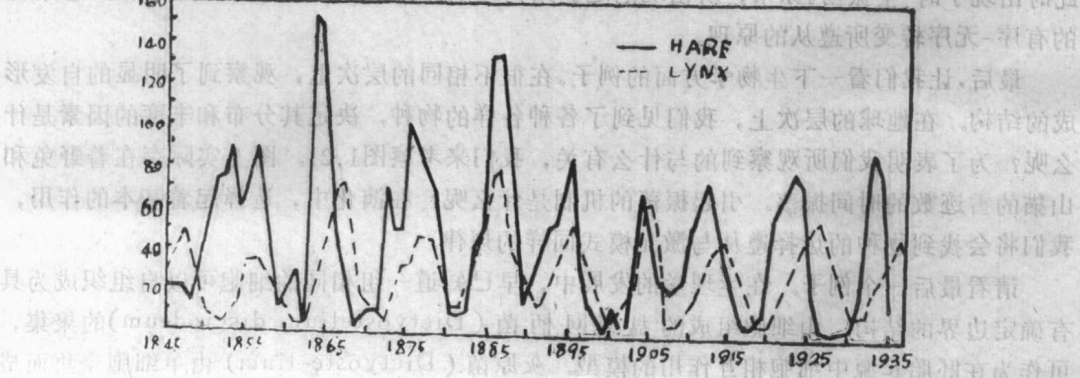


图1.21 山猫和野兔丰度的变化，以Hudson Bay公司所收到的毛皮的数目来表示