

Δ*耗散结构简介

(Dissipative structure)

神经细胞

目录

- 一. 退化与进化
- 二. 自组织现象和耗散结构
- 三. 开放系统的热力学第二定律
- 四. 远离平衡态的分叉现象
- 五. 涨落导致有序
- 六. 高级分支和混沌状态
- “耗散结构”参考书

2

耗散结构理论由普利高津 (I. Prigoging) 于1967年创立, 他1977年获诺贝尔化学奖。该理论中的许多概念, 如开放系统、负熵流、突变等, 已成为研究自然现象和社会问题的有力武器。

一. 退化与进化

时间箭头

热力学: 孤立系 —— 能量退化
生物学: 开放系 —— 物种进化
有序 $\xrightarrow{\text{退化 (克劳修斯)}}$ 无序
$\xleftarrow{\text{进化 (达尔文)}}$

3

二. 自组织现象和耗散结构

自组织现象: 在一定外界条件下, 系统内部自发地由无序变为有序的现象。这种演化过程叫自组织过程。

1. 自组织现象中的空间有序结构

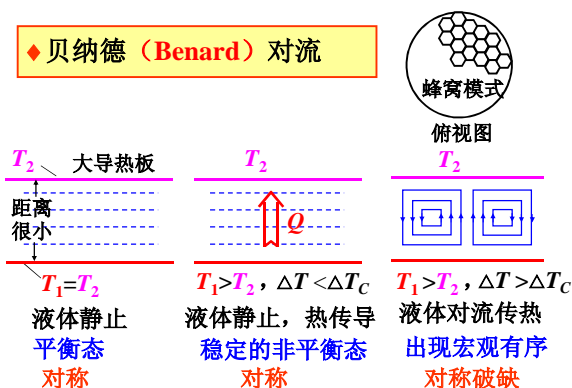
▲无生命界:

- ◆ 六角形的雪花;
- ◆ 鱼鳞状的云;



4

◆ 贝纳德 (Benard) 对流



5

千千万万的分子被组织起来, 参加一定方式的宏观定向运动, 使能量得到更有效的传递。

▲生物界

◆蛋白质大分子链由几十种类型的成千万个氨基酸分子按一定的规律排列而成。

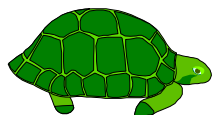
大脑是150亿个神经细胞有规律排列组成的极精密极有序的系统。假定这种排列是随机形成的, 而且每一种排列有相等的概率, 那么即使每秒进行100次排列, 也要经过 10^{109} 亿年才能出现一次特定的排列。而地球年龄才几十亿年!

6

◆树叶有规则的形状;



◆龟背的图案;



● ● ● ● ● ●

7

▲无生命界:

◆ B - Z反应

扎玻庭斯基 (Zhabotinski)

柠檬酸+丙二酸，铈（Ce）离子催化。

反应物浓度

{ 接近平衡 态比例 远离平衡 态比例 }	→ 生成物均匀、对称、无 序	
	→ 生成物 颜色	{ 黄色 } (B) 无色 } 周期交替 或 红色 } 周期交替 蓝色 } (Z)

说明离子浓度出现了时间有序结构。

9

◆ 中华鲟回游，候鸟迁移，...

自组织现象是与热力学第二定律的
从有序 \Rightarrow 无序的时间箭头不一致的！

要将它们用物理学规律统一起来，必须抓住孤立系统与开放系统的区别。

10

孤立系统进行自发过程 $S \uparrow$ 。

孤立系统 $d_i S \geq 0$ ，开放系统则可能 $dS < 0$ ：

由克劳修斯等式和不等式有 $dS \geq \frac{dQ}{T}$

对可逆过程有 $dS = \frac{dQ}{T}$

当 $\delta Q < 0$ 时, 必有 $\delta S < 0$ 。

11

对不可逆过程有 $dS > \frac{dQ}{T}$ ，当 $dQ < 0$ ，且足够“负”时，仍可能 $dS < 0$ 。

所以，要实现自组织，系统必须开放。

对开放系统, 除 $d_i S$ 外, 还有与外界能量或物质交换引起的熵变, 称为熵流, 用 $d_e S$ 表示。

开放系统总熵变 $dS = d_i S + d_e S$

$d_e S < 0$ — 负熵流, $d_e S > 0$ — 正熵流

若**负熵流**足够强，以至 $|d_e S| > d_i S$ 时，

1

非平衡的不稳定态在一个细小的扰动下，就可以引起系统状态的突变，使状态离开 (b) 线沿着另外两个稳定的分叉 (c) 或 (c') 发展，这称为**分叉现象**。

19

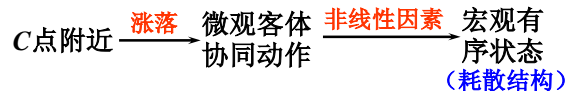
五. 涨落导致有序

分叉现象表明，系统在**临界点附近**的微小变化 (**涨落**) 可以从根本上改变系统的性质，这叫**突变现象**。

自组织总是通过某种突变过程来实现的。

λ_c 的存在是伴随耗散结构现象的特征。

系统处在不同状态，涨落的作用可以很不同：



20

不是任何涨落都能得到放大，**只有适应系统动力学性质的那些涨落**，才能得到系统中绝大多数微观客体的响应，从而波及整个系统，将系统推向新的有序结构 —— **耗散结构**。

耗散结构形成的条件：

- (a) 开放系统 (d) 正反馈
- (b) 远离平衡态 (e) 非线性抑制因素
- (c) 涨落

21

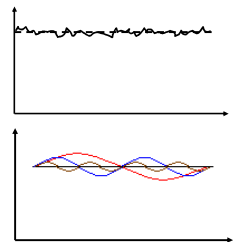
例如，假设某时刻在某个平衡态有如图所示的涨落（涨落总是存在的）：

为简单起见，假设右图是一个复杂的波形。

可以认为它是由许多不同频率的正弦波按一定比例叠加而成。

(傅立叶分析)

每一正弦分量称为一种涨落分量。



22

与平衡态或近平衡态不同，在远离平衡态的区域，涨落可以使系统的状态发生突变。随着外界控制条件的变化，有的涨落分量很快衰减掉，有的涨落分量却得到放大。当放大了宏观尺度，就使系统进入某种有序状态。

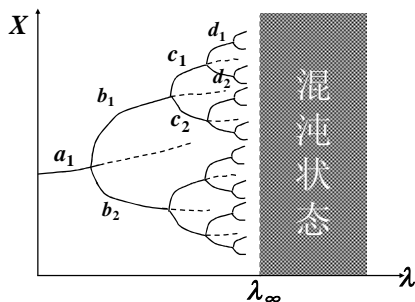
某种医学理论认为病人服用或注射某些药物，重要的不是起补偿作用，**而是造成一种涨落**。

23

例如，人体中有不少ATP（三磷酸腺苷），但是冠心病病人每次只要注射 20mg ATP就有明显疗效。它是通过引起某种涨落使病人向健康人转化，从而建立一种新的有序状态。

24

六. 高级分支和混沌状态



通过倍周期分叉走向混沌

25

如贝纳德实验中,当 ΔT 很大且继续加大时,会出现多种花纹的更替,最终走向湍流(混沌)。

高级分支现象说明在远离平衡态时系统可以有多种可能的有序结构。高级分支会积累起各次分支中产生的自组织本领,从而使系统的功能变得丰富和完备起来,现出复杂的时空行为。生命的进化和整个世界的发展也可以用高级分支行为来说明。

26

当系统偏离平衡态足够远时,系统可能具有的耗散结构也非常多。

由于涨落是无法控制和偶然的,所以此时系统瞬时状态的不确定性很大,进入了一种无序态。这种无序态不同于热力学中平衡的无序状态。无序的时空尺度是宏观量级的,这种状态称为混沌(chaos)状态。

27

耗散结构理论在近年来有了很大的发展,而且在实践中已经运用。

- ◆ 美国有人研究东西部人口的空间分布规律;



- ◆ 加拿大有人研究捕鱼的最佳方案;



- ◆ 荷兰有人研究能源的最低消耗方案...

28

定量的研究要提出物理模型,建立数学模型,然后再解相应的微分方程组。

如果我们能弄清自组织现象的规律,自觉控制一些参数,使事物(有生命,无生命,自然界,社会)朝着我们所希望的耗散结构的方向发展,那么这个世界将会更加美好!

29

“耗散结构”参考书

《大学物理学》(第二册) 张三慧主编
《耗散结构论》 沈小峰、冯端
《非平衡系统的自组织》 普里高津
《非平衡热力学和耗散结构》 李如生
《物理学导论》上册, 陈宏猷, 周浩祥
《新概念物理教程》热学 赵凯华, 罗蔚茵



—完—

30