

全国非平衡统计物理会议
文集

西安 · 1979

Proceedings Of the Symposium
On Non-equilibrium Statistical Physics
(The Dissipative-Structures)
Xian • China • 1979

编辑出版者：全国非平衡统计物理
会议(西安)文集编辑组

印刷者：陕西省科学技术情报
研究所印刷厂

发行处：西北大学科研处(西安)

105
13.24

代 序

1979年八、九月间，中国物理学会委托西北大学和北京师范大学在西安主持召开了全国非平衡统计物理学术讨论会，中心论题是布鲁塞尔学派所提出的耗散结构理论。会议分三个阶段进行：（1）有关问题的系统介绍，及专题报告；（2）宣读和讨论论文；（3）专题讨论。

这次会议是成功的。到会代表百余人，遍及全国；除物理学工作者外，许多化学、数学、生物、医学、天文以及哲学等方面的专业工作者也参加了会议。令人兴奋的是，布鲁塞尔学派的创始人、诺贝尔奖金获得者普利高津教授不远万里，前来为我们作了多次精彩的报告，详细介绍了他们的理论以及最新的研究成果。普氏的到来，为会议增添了光彩。真是“有朋自远方来，不亦乐乎”！会上宣读的报告和论文达二十多篇，数虽不多，然而相当有意义，特别是关于天文、医学以及哲学等方面的论文，受到了与会代表的好评，也引起了普氏的兴趣和重视。

这次会议，起到了动员、团结、鼓舞不同学科的科学工作者一齐来发展非平衡统计物理理论和应用研究的作用，是一个良好的开端。我们相信，在学习布鲁塞尔学派及其他学派（如美、日、西德等国）的基础上，通过今后艰苦扎实的工作，一定能逐步形成自己的研究风格和中国的学派。

这次会议的成功，是和全国科协、中国物理学会、陕西省委及省科委的关怀、支持分不开的，在此我们表示衷心的感谢！

为了汇总我们已有的研究成果，和科学同行进行学术交流，并鼓舞今后的斗志，我们特将这次会议的部分专题报告和论文（摘要）付印出来，这就是今天奉献在同志们面前的这本文集。她是由北京师范大学陈浩元和西北大学湛星华负责编辑而成的。

陕西省科技情报所热忱地承担本文集的印制工作，使她得以早日问世，我们在此顺致诚挚谢意。

江仁寿

1979.10

目 录

代序.....	江仁寿
---------	-----

专题报告

耗散结构研究大有前途.....	江仁寿 (1)
耗散结构的热力学基础	
——I. Prigogine 的非平衡热力学 导 引.....	湛星华 (7)
二分支理论的泛函分析导引.....	王戌堂 (36)
非平衡系统中自组织现象	
——三分子模型的耗散结构.....	潘 湘 (58)
耗散结构在化学反应中的应用.....	刘若庄 (68)
反应扩散过程的概率分析.....	汪培庄 (77)
Prigogine 学 派非平衡态统计力学简介.....	徐京华 丁达夫 (98)
临界动力学与统计场论.....	郝柏林 (144)
关于理性热力学的评述.....	李湘如 柳文琦 (156)

论文摘要

从非线性非平衡热力学理论看 P P I 反应的恒星结构的稳定性	
..... 彭秋和 黄克谅 湛星华 何香涛	(177)
动脉粥样硬化与耗散结构.....	卢 侃 郑宝发 (181)
非平衡系统的概率模型及 Master 方程的 建立.....	严士健 李占柄 (185)
多支图与反应过程.....	汪培庄 刘若庄 湛星华 (188)
生物大分子复制模型中的非平衡相变现象.....	王宝翰 (191)
关于不稳定系统的弛予过程.....	周光召 李怀智 (196)
临界爆轰波的稳定条件和螺旋爆轰波.....	孙锦山 (199)
Glansdorff-Prigogine 判据与最小熵产生定理.....	陈式刚 (201)
子动力学的一种表述形式.....	王顺金 (204)
耗散结构理论中的矛盾运动.....	沈小峰 湛星华 (208)

Proceedings Of the Symposium On Non—equilibrium Statistical Physics (The Dissipative—Structures)

Contents

General Introduction Y. S. Chiong (江仁寿)

A. Lectures

1. On the importance of the study
of Dissipative—Structures.....Y. S. Chiong (江仁寿) (1)
2. The thermodynamic foundation of the theory
of Dissipative—Structures.....K. H. Zhan (湛星华) (7)
3. Function analysis for the theory
of bifurcations.....S. T. Wang (王成堂) (36)
4. On Tri—molecular models.....S. Pan (潘湘) (58)
5. Applications of Dissipative—Structures
in chemical reactions.....R. Z. Liu (刘若庄) (68)
6. Probability analysis for
reaction-diffusion processes.....P. Z. Wan (汪培庄) (77)
7. A short introduction of the nonequilibrium statistical
mechanics as developed by the Prigogine school,
.....g. W. Shu (徐京华) and D. F. Ding (丁达夫) (98)
8. Critical Dynamics and Statistical
Field theory.....B. L. Ho (郝柏林) (144)
9. Non—equilibrium thermodynamics, a
Review.....X. R. Li (李湘如) and W. Q. Liu (柳文琦) (156)

B. Papers

10. The stability of stars with PPI reaction, on the basis
of the theory of Non—Linear non—equilibrium thermo-
dynamics.....Q. H. Peng (彭秋和), K. L. Huang (黄克谅)
K. H. Zhan (湛星华), X. T. Ho (何香涛) (177)

11. Atherosclerosis and Dissipative—Structures.
 K. Lu and (卢侃) B. F. Cheng (郑宝发) (181)
12. Probability model of nonequilibrium
 system and the Establishment of master
 equation. S. J. Yan (严士健) and Z. P. Li (李占柄) (185)
13. Multi—bruach Graph and the chemical reaction.
 P. Z. Wan (汪培庄), R. Z. Liu (刘若庄)
 (188)
 K. H. Zhan (湛垦华)
14. Non—equilibrium phase transition phenomena in the
 model Biopolymer Replication. B. H. Wang (王宝翰) (191)
15. On the relaxation process of unstable
 systems. G. Z. Zhou (周光召), H. Z. Li (李怀智) (196)
16. Stability of critical detenation and spin detenation
 waves. J. S. Sun (孙锦山) (199)
17. On the Prigogine and Glansdorf's criterion
 and the principle of minimum entropy
 production. S. G. Chen (陈式刚) (201)
18. On expression of sub—kinetics. S. J. Wang (王顺金) (204)
19. On the philosophical significance of Dissipative—
 Structures. X. F. Shen (沈小峰), K. H. Zhan (湛垦华) (208)

耗散结构研究大有前途

江 仁 寿

(西北大学)

一、引 论

耗散结构是一个新概念，它所研究的领域，是一个崭新的大有发展前途的领域。这一研究，以热力学和统计力学为基础，发扬光大，涉及方面之广可以说是科学史上罕有的，各门学科诸如无生命的、有生命的、甚至社会文化、哲学等等，都受其巨大而深刻的影响。布鲁塞尔学派，其领导人为普利高津教授，在这一方面做了许多有价值的工作。其他国家，如美、日等，正在急起直追，竟相比美。

这一新学科的异军突起是偶然的吗？否！否！

众所周知，我们所处的二十世纪，在人类知识上，无论自然科学还是社会科学，是一个大革命、大跃进的世纪。1900年，普朗克的量子论破门而出；1905年，爱因斯坦的相对论诞生；1911年，卢瑟福的原子结构问世；接踵而来的，是薛定谔和海森堡等人的量子力学；等等。技术上，由于有了新的科学理论作指导，其成就也是日新月异，灿烂辉煌。

中国有句古话，“仰观俯察”，说的是人们怎样获得知识。不妨问一下，现在我们能望多远、察多深呢？

的确，我们今天可以探索的物理世界的尺度已增加到令人吃惊的程度。在微观范围内，物理量度在 10^{-15} 厘米数量级，时间在 10^{-22} 秒数量级。在宏观方面，宇宙学把人们带到 10^{10} 年的时间数量级，即“宇宙年龄”，从而在距离上达到 10^{28} 厘米的数量级（即信号能接收到的最远距离）。

就在这科学大发展的宜人形势下，关于物理世界本质的一些新奇的特点，近来被陆续地发掘出来。耗散结构就是其中之一，它是近代科学发展中的一个及时的产物。

二、热力学的发展

上面说过，耗散结构是在热力学的基础上发展起来的。最有意义的是，在科学发展史中，热力学第二定律从来占据重要的基本地位，影响所及，远远超出原来的范围。关

于这一事实，我们只要提一下波尔兹曼关于动力理论的工作，普朗克关于量子论的发明，以及爱因斯坦的自发辐射理论，就足够了，因为它们的主要根据都是热力学第二定律。

早在1850年间，克劳修斯给了热力学第二定律一个戏剧性的表述，即“宇宙的熵增加着”，就是说，宇宙的熵在增加，在趋于最大。照这样说来，宇宙的下场是“寂死”。事实果真如此吗？否！事实上，自然界的事物，过去也好，现在也好，推到未来也好，都在不断地前进发展着，越来越多，越来越繁。局部来讲，当然有生有灭；整体来讲，总是通过代谢，不断地由低级到高级进化着。恰恰是通过热力学第二定律，把进化这一概念引进了物理学中。这是一个可喜的成就。无疑地，通过普利高津学派及今后其他学派的工作，进化这一概念将发挥更大的作用。

1930年，普朗克在他的名著《热力学》中，可以说是首次明确地表述了热力学第二定律。照他看来，运动过程有可逆和不可逆两种。有摩擦的过程总是不可逆的。因此，可逆过程是一种理想的过程，绝大多数的过程是不可逆的。由此得出如下的基本公式

$$dS \geq \frac{dQ}{T} \quad (\text{对于封闭系统}) \quad (1)$$

其中：S称为系统的熵，T是系统的绝对温度，dQ表示系统在此温度下吸入的热量，“=”用于可逆过程，“>”用于不可逆过程。

由此可见，不可逆过程的存在是热力学第二定律的基础，而熵S是判别过程的函数，在孤立系统中，对于可逆过程， $dS = 0$ ；对于不可逆过程，则 $dS > 0$ 。

自古以来，我们中国人就喜好观察和善于观察，对于事物过程早已有了无比深刻的领会。例如李白，在他的《将进酒》的诗中就写过：“君不见黄河之水天上来，奔流到海不复回；君不见高堂明镜悲白发，朝如青丝暮成雪！”上联指流水，下联指人生，这都是不可逆过程呀！还有（其实多得很）《红楼梦》中贾宝玉写过一首什么词儿，其中有这样一句：“东是水，不复向西流！”一个用诗，一个用词，都十分深刻地说明了不可逆过程的存在。

我们这样谈，其目的主要是为了强调事物的两种过程，可逆和不可逆过程，特别是强调不可逆过程，也即强调热力学的基本规律。看来，人们以往强调可逆过程较多一些。这种热力学称为平衡热力学，而它的成就也是十分巨大的。研究不可逆过程的所谓非平衡热力学，只是在1945年以后，由普利高津根据经验并采用1931年昂赛格提出的“倒易关系”，才被建立起来，兹后迅速地在各方面发展着。

非平衡热力学可说是一门新兴的学问，因为它才卅多一点嘛。它是怎样从平衡热力学发展起来的呢？很有意思！其中法宝有三：

①“局部平衡假设” 把一个非平衡系统看作由无限多的局部平衡的小系统构成的。局部小系统，范围虽小，可是内含粒子足够多；在此小天地中，碰碰撞撞，推推挤挤，很快达到平衡；所以我们说，局部的平衡的小系统。既然是平衡的，那么平衡热力学的关系式，例如吉布斯关系式，自然就可以象搬家一样搬过来了。

②线性关系（是唯象关系） 不可逆过程 p 的流 J_p 与广义力 X_p 是线性关系，即

$$J_p = \sum_{\rho'} L_{\rho\rho'} X_{\rho'} \quad (2)$$

并且 $L_{\rho\rho'} = L_{\rho'\rho}$ (昂赛格关系) (3)

③不可逆过程的熵生产率 P , 由①②可得出

$$P = \frac{dS_i}{dt} = \sum J_p X_p \geq 0 \quad (4)$$

方程(4)是不可逆过程的宏观热力学的基本公式。很容易看出, 若 ρ 这些不可逆过程都不存在, 那么同时地有

$$J_p = 0 \quad \text{和} \quad X_p = 0$$

于是 $P = 0$, 而这样就回到了平衡热力学。

昂赛格关系的重要性, 在于它的普遍性, 并曾经过许多实验的证实。这一关系的发现, 可以说是热力学发展史中的一个转折点。

以上所述的非平衡热力学是线性的, 称为线性非平衡热力学。大约1970年左右, 由于布鲁塞尔学派的工作进展, 出现了所谓非线性非平衡热力学。顾名思义, 它研究的是非线性的不可逆过程; 然而所得结果, 其新奇, 其重大, 远远出乎意料之外! 耗散结构就是其中的硕果。一句话, 它是近年来热力学甚至是科学上的一个重大突破。

三、耗散结构

众所周知, 物理学讨论的总离不开运动、结构以及能量问题。一般地说, 有什么运动就有什么结构, 而能量则是一个聚散的问题。普利高津曾经把结构分为两种, 即平衡结构和耗散结构; 并且指出, 耗散结构有三方面互相作用着, 导致意外的现象。这三方面是: ①表示化学方程的函数或功能, ②不稳定结果的时空结构, ③触发不稳定的涨落。他的示意图如图1所示。

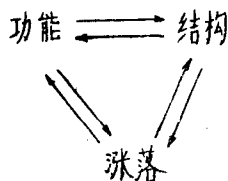


图1

这是布鲁塞尔学派对于耗散结构的一个总的看法。总之, 功能怎样, 结构就怎样, 破坏稳定的涨落也怎样, 三者连环, 互相作用, 决定耗散的时空结构。

现在让我们看看这个学派的中心思想。他们宣称: “非平衡可成为有序之源, 不可逆过程可导致称为耗散结构的一种新型的物态。”这就是他们的出发点。这种新型结构, 所谓耗散结构, 必须到不可逆过程中去找, 其实还须要在非线性的(如化学反应)不可逆过程中去找, 因为线性不可逆过程中是不存在这种结构的。关于这个出发点的正确性的证明, 我只提出一些定性的看法和其思想线索。

贝纳特不稳定是一个鲜明的耗散结构的例子。在两个水平板(无限大的)之间, 满贮液体, 上板温度为 T_1 , 下板为 T_2 , 当温度梯度适当时(即小于某一特征数值时), 导热进行着。这是一个纯粹导热问题。可是, 当温度梯度由于加热增强而达到一个确定的数值时, 就出现一些有规则的对流细胞。这些新的流样的出现, 的确需要宏观大的分

子数在宏观长的时间内,有条不紊地进行运动。它是相当于一个超分子组织。这就是说,稳定破坏之后,自发地出现了新组织。这种新组织,我们称它为耗散结构,因为要维持它,必须供给它适当的热量。

所以定性地说,耗散结构是在热力学支不稳定后,发生所谓二分支而得到的一种新型的有序结构,它根本不同于经典热力学所讨论的所谓平衡结构,例如晶体或液体。后者不需要提供维持的能量或质量,而前者的生存非有外界供应不可。有人说,平衡结构是死的,而耗散结构则是活生生的结构。这是很有道理的,因为死人不需什么供应,而活人非吃不成嘛。

关于这一点,还是普利高津教授说得好。他说:“一个城市或许是一个好例子吧。城市要存在下去的话,只有它既是输入粮食、燃料及其它货物的中心,同时又是输出产品和废物的中心,这才行。”

不言而喻,“物尚如此,人岂能外!”有生命的系统,至少在原则上也是如此吧。

现在让我们谈谈涨落现象。

有趣的是,按普利高津等人的看法,在任何情况下,微细的涨落总是有的,即是说,涨落是固有的现象。但其中有差别。在紧靠热力学平衡的时候,涨落起着恢复作用,即由于涨落的衰减和消失,使系统回到原来的平衡态。可是,在远离平衡的时候,事情就大不同了。此时系统中一些固有的涨落苗苗,有些衰减而消失,在自然的摇篮内被扼杀了;可是有些运气好,又被放大而茁壮起来了。于是出现新的物态结构。这样说来,涨落可说是事件变化的触发机,或导火线。它既是平衡的“保皇”力量,又是破旧创新,达到有序结构的“先行官”。涨落之用,可谓大矣。

我们这里所举的例子,虽然来自流体力学,但不为它所限;在化学系统中,同样出现这样的意外情况。总之,事实说明了这个结论:非平衡可以是有序之源。

下面略谈一下二分支。

最好用著名的布鲁塞尔反应来说明。它是一个按如下计划进行的化学反应:



A、B和D、E分别代表被维持不变的初始反应物和最后产物,而X、Y是中间分量的浓度,它们随时间变化着。把反应常数归一后,便得到如下的反应方程组:

$$\frac{dx}{dt} = A + X^2 Y - BX - X \quad (6a)$$

和

$$\frac{dy}{dt} = BX - X^2 Y \quad (6b)$$

显然,它们是非线性的。在定态时,

$$\left(\frac{dX}{dt} \right)_{\text{定态}} = 0, \quad \left(\frac{dY}{dt} \right)_{\text{定态}} = 0,$$

从而解得定态值为

$$X_0 = A, \quad Y_0 = B/A \quad (7)$$

其中 X_0 和 Y_0 是 X 和 Y 在定态时的浓度。

我们在 X_0, Y_0 的临近研究离开平衡时的方程解,即令 $X = X_0 + x$, 和 $Y = Y_0 + y$, 然后将它们代入方程组6a, 6b。利用热力学稳定原则或正模分析,得出的结果是:

若 $B > B_c = 1 + A^2$ (8)

则解变为不稳定。在这里, B 称为特征参数, 而 B_c 为临界参数。

在上面处理中, 为简便计而忽略了扩散项; 若加进它, 结果就复杂多了, 可是基本情况还是一样。

图2描绘的是一般的可能情况。

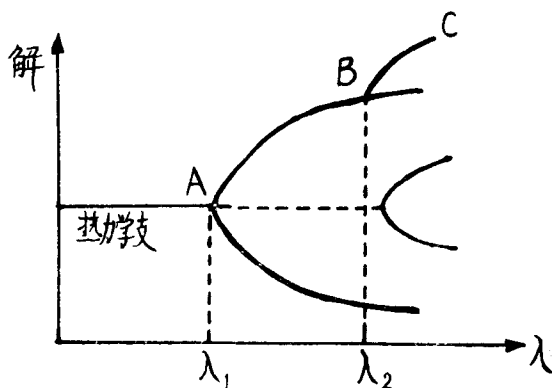


图2

一般地讲, 若离定态不远时, 仍然得出单一的热力学解, 从而得出一个稳定的热力学支; 可是若 $\lambda \geq \lambda_1$, 则得到的是, 在A点开始出现二分支, 开始得到三个解, 其中一个是不稳定的热力学支。离平衡更远, λ 更大时, 例如 λ_2 以后可能出现第二个二分支, 以及高级分支。有趣的是, 在B点又出现了一个二分支, 这是分支上的分支!

令人深思, 耐人寻味的是, 在某种意义上讲, 二分支把“历史”引进物理学中来了。让我们再看看图2吧。假想有个系统, 实验表明其二分支情况, 恰如图2那样。我们研究态C, 已知它是增加 λ 而来到这一点的。那么, 说明这个态 X , 全面了解它, 这就意味着需要知道系统必须经过二分支点A和B这段过去的故事。这就是说, 把历史因素引进物理和化学中来了。一般讲, 物理不问历史, 也无权过问历史; 似乎只有研究生物, 社会和文化现象的那些科学, 才有权过问历史。这是偏见, 可是由来已久了。其实, 在材料力学中, 诸如弹性问题、强度问题等等, 其中往往要涉及对象的过去。可是, 物理比较狠心, 硬把这个因素舍去了。

好! 让我们检讨检讨, 然后举起双手, 欢迎这位被多年冷淡甚至遗忘的“来客”——历史因素吧!

四、小 结

耗散结构的研究已取得了可喜的突破，是一项大有发展前途的研究。布鲁塞尔学派的出发点（据他们的自白）是：“非平衡可以是有序之源”。这在哲学上讲，是两点论的典型表示。平衡同非平衡，稳定同不稳定，有序同无序（亦即治和乱），线性同非线性，平衡结构同耗散结构，无生命物同有生命物等等，这都是事物中对立统一的两方面嘛。多年来（甚至可说，自古以来），一点论搞得太热闹了。这是一个遗憾。布鲁塞尔学派，勇于搞两点论，他们注意了一般不为人们注意的地方，在非平衡中找有序。这不是在鸡蛋里找骨头吗？他们竟然找到了骨头——耗散结构！这是两点论的胜利！

耗散结构的研究，在理论方法上，在数学工具上，在研究对象上，可以说都是新颖的。这里就不一一提及了。

总起来说，布鲁塞尔学派的工作成就是非常巨大的，可是，照他们自己的说法，“还有许多工作需要去做”。事实也确是如此。

最后，我只提一件有趣的事情，作为总的看法和殷切希望。

在四十年代，物理学家薛定谔写了一本书，名叫《生命是什么？》。他用的是热力学加量子力学，在它们的理论基础上，探讨生命活动的规律和遗传变异等问题。薛定谔这一倡导，影响很大。不少物理学家不搞老本行而去搞生物了；不少搞生物的人开始重视物理学的研究了。例如海森堡有个学生名叫德尔布鲁克，现在是有名的诱发突变生物学家了。

这是很好的现象。普利高津教授也曾提起过，热力学、数学和化学三者结合起来，新奇的特点就会不断出现。有人说，热力学奥妙得很，第二定律是一切规律中最玄的规律。有了热力学因素的加入，任何学科就会生气勃勃。它像味精一样，放在白水里亦是好汤！由此可见，我们今天大学里，物理系课程中没有生物，轻视化学的现象，应该有所改变才好，否则太不合时宜了。

不言而喻，时至今日，为了迅速推动整个科学技术前进，发现新事物，创造新奇迹，为我国四化而贡献力量，在科学上搞大联合，不仅是人的联合，主要是学科的联合，我看是非常必要的了。俗话说：“分久必合”。对于自然科学来讲，现在是到了“合”的时候了！

耗散结构的热力学基础

——I. Prigogine的非平衡热力学导引

湛 垦 华

(西北大学)

一、引言

在这里,简明地介绍一下布鲁塞尔学派提出的在远离平衡区的非平衡状态下,可能出现稳定化的有序的耗散结构组织的热力学理论,同时也谈谈自己对这一理论的一些看法,与到会的同志们共同学习讨论。

现在越来越使我们清楚地看出,在自然界、科学实验、甚至社会现象中,从宏观的角度来看,有必要严格地区分两种类型的稳定化了的有序化宏观体系结构:平衡状态下的稳定化有序结构——平衡结构;耗散状态下的稳定化有序结构——耗散结构。

这里所谓的平衡,是从热力学角度说的平衡,即在与外界没有物质交换条件下,宏观体系的各部分在长时间不发生任何变化(当然,从组成体系的微观分子角度来看,它并不是单纯静止的,而宏观体系热力学平衡的形成和维持,却正是依靠了在平衡附近不易觉察的分子涨落的可逆转变)。

耗散结构这个名词,是普利高津在1969年首先提出的,它是指当体系处于非平衡状态时,通过体系与外界进行能量和物质交换而形成和维持的一种稳定化了的宏观体系结构,即在非平衡态下宏观体系的自组织现象。

晶体和液体,这种稳定化的有序化结构,是较典型的平衡状态下的稳定化结构。

这里所谓的稳定化,主要是指在空间和时序上宏观层次呈现的某种有序化现象。

存在相干图象的激光束,连续介质力学中有名的贝纳特(Bénard)花样,化学反应中的有序结构,生物界到处呈现的有序性,社会现象中的有序性等等,现在看来,它们在一定条件下,都可看成是非平衡状态下耗散结构的实例。

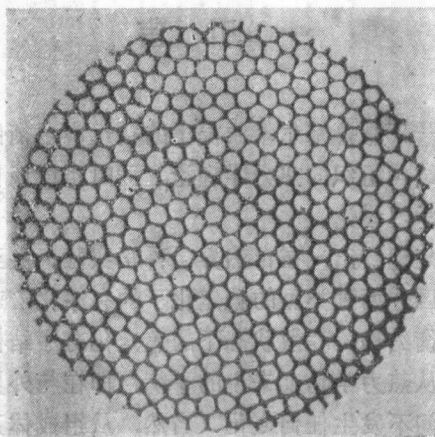
通俗一点说,平衡结构是“死”的有序化结构,而耗散结构是“活”的有序化结构。

对平衡状态下宏观体系行为的描述,至今已有了一套较完整的热力学理论,这就是比较定型化了的经典热力学。

对非平衡状态下宏观体系行为的描述, 需要一套新的热力学理论。

建立在昂赛格倒易关系(1931)和最小熵产生原理(1945)等基础之上的所谓“不可逆过程热力学”, 现在已很清楚, 它仅仅能描述接近平衡区域。在这个区域, 热力学力(如温度梯度、浓度梯度、势梯度、化学亲和势, ……)和热力学流(如热流、电流、扩散流、化学反应率, ……)可由线性关系近似地相联系。因此, 确切的名称应是“线性非平衡热力学”。今天, 它已成为较为经典的课题了。

人们对远离平衡的区域, 即非线性非平衡区域的研究, 至今还不是很成熟的。在这个区域内, 热力学力和热力学流之间的关系, 是非线性的。以普利高津为首的布鲁塞尔学派, 坚持了卅多年的工作, 把热力学理论推广到非线性区域去, 终于建立起了非线性非平衡热力学的初步框架。特别是1969年, 普利高津提出了在远离平衡区, 在一定条件下, 可能出现稳定化的耗散结构这一设想之后, 他们逐步建立了一套非线性非平衡热力学方法, 并把这一套方法用于解释、描述某些化学反应和生物进化过程, 取得了有益的成果。

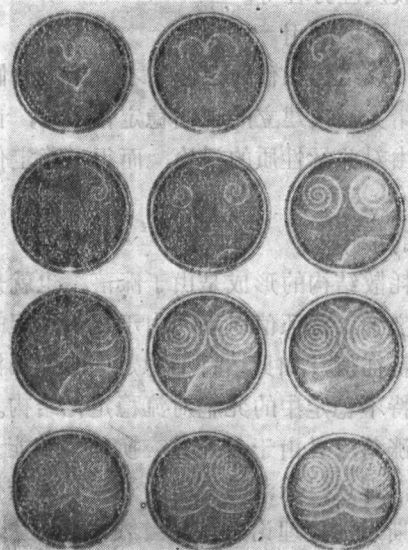


图一

连续介质力学中的贝纳特(Benard)不稳定, 是布鲁塞尔学派最早用来说明他们的耗散结构物理图象的例子。我在这里仍把它用来作为耗散结构的一个实例。〔图一〕这个实例说, 从下面加热一个液体, 液体会有一个温度梯度, 当温度梯度小于某一特征值时, 热由传导的方式通过液体, 不存在一种有序的自组织现象; 但继续加热, 当温度梯度达到某一特征值时, 一种有序的对流元胞会自动地呈现。整个体系由无数个对流元胞组成, 它对应着一种高度有序化的分子组织, 此时热量通过宏观的对流而传递, 这种图象即贝纳特花样。这样一个变化过程, 又称为贝纳特不稳定。这种在不稳定之上, 当体系到达某一特征值时出现的稳定化的宏观有序的新组织、新结构, 普利高津等人把它称为耗散结构。

在化学中, 丙二酸在催化剂 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 氧化还原偶以硫酸盐形式加在溶液中)作用下被溴酸氧化的化学反应(Belousov-Zhabtinski 反应), 在外加物中的一定浓度范围内, 会出现浓度随时间周期性改变的化学振荡, 周期为30秒, 可持续50分钟之久,

这种化学振荡是一种时间性的耗散结构〔图二〕



图二

根据我对布鲁塞尔学派建立的耗散结构理论或广义热力学的学习，体会到他们的这一套方法是建立在如下基础之上的：

1. 非平衡是有序之源

波尔兹曼的热力学第二定律指出，熵是无序的一种量度，熵增加这个定律就是组织无序化的增大律。孤立系统的熵，终究要达到一个极大值，它对应着一个热力学的平衡态。布鲁塞尔学派从对热力学第二定律的分析中看出，高熵对应于无序化增加，低熵对应于有序化增大，若平衡态对应无序，则非平衡就是有序的起源。耗散结构在布鲁塞尔学派看来，它是说明“非平衡是有序之源”这一基本出发点的必然归宿。

2. 非平衡是由扩散和化学反应两种过程引起的

布鲁塞尔学派认为，引起体系处于非平衡状态的众多复杂过程，其实可归纳为两种类型，一种是扩散型，比如热传导、电传导、物质扩散等；另一种是化学反应型，比如化学反应、热核反应、光合作用等。为了便于建立非平衡体系的数学描述，他们还把扩散型力与流的关系简化为是线性的，而只把化学反应型看成为是非线性关系。

3. 局域平衡

在布鲁塞尔学派建立的广义非平衡热力学方法中，他们有一个重要的局域平衡假设，即认为体系总的来说是非平衡的，但对每一个单元体积来说，却是平衡的，可以用经典热力学的方法来描述。而任两个单元之间，其平衡的数据却可能是不相同的，因而体系总的来说仍是非平衡的。

4. 连续介质力学成果的借用

研究宏观体系较成功的学科，除热力学之外，另一个领域是连续介质力学（或狭义地说流体力学）。布鲁塞尔学派在建立广义非平衡热力学的过程中，把非平衡体系的不

可逆过程,近似地看成是一种连续变化系统,借用连续介质力学的成果来描述它,由此建立起它的平衡方程或扩散反应方程等。

5.李雅甫诺夫稳定性理论的利用

为了要判别稳定化的耗散结构在什么条件下才出现,他们在建立起体系的扩散反应方程之后,利用了李雅甫诺夫等人建立的现代稳定化理论,也即找出了“超熵产生”是方程的李雅甫诺夫函数,由对此量性质的讨论,而得出稳定化的耗散结构可能出现的结论。

6.爱因斯坦涨落理论的推用

布鲁塞尔学派认为,耗散结构的形成是由于涨落,也就是说,在某个特征值以下,例如贝纳特不稳定中的温度梯度特征值以下,由于涨落引起的某种小对流效应将由于平均而变弱。只在达到某个特征值,如贝纳特不稳定中的特征温度梯度,涨落被放大了并给出宏观效应,即如贝纳特不稳定中的元胞对流稳定化结构。因此,耗散结构的出现,本质上对应于一个宏观巨涨落,并由于与外界交换物质和能量而获得稳定,也就是耗散结构所表现出来的有序性,即通过涨落的有序,这与平衡结构(晶体、液体等)的有序化完全不同。成熟的爱因斯坦涨落理论,在此当然大有用途,他们应用了并发展了爱因斯坦的学说。对这部分的介绍可参阅汪培庄同志的专题介绍。

7.分支数学理论与随机理论

在研究耗散结构的过程中,他们还充分应用了分支现象数学理论和随机数学理论。关于这些,可参阅王成堂同志与汪培庄同志在会上将作的专题介绍。

二、孤立系与开放系

大家都知道,从热力学的角度看,在一个数学表面所包围的宏观体积内的体系,可以根据它们与外界交换物质和能量的情况,区分为孤立系与开放系两种。

我们的目的是研究在什么情况下一个宏观体系可能从一种无序状态,转变为一种有序状态,或说形成一种稳定化的自组织。从经典热力学已知,无论孤立系或者开放系,若永远处在平衡状态,就谈不到无序有序之间的转变问题。看来要找到从无序到有序的转变,只能在非平衡的体系中去找。我们这一节的任务,就是粗略地定性地来估计一下,在非平衡状态下,这二种体系中的哪一种,在什么条件下可能从无序状态转变为有序状态?又是哪一种,可能形成耗散结构?

(一)孤立系不可能自发地从无序转变为有序结构

热力学第二定律告诉我们,对于一个非平衡的孤立系来说,存在着一个态函数熵 S ,它单调地增加着,直到达到它的极大值,此时系统处于热力学平衡态,即

$$\frac{ds}{dt} \geq 0 \quad (= 0 \text{ 平衡态}) \quad (2.1)$$

也就是说,只有非平衡状态下的不可逆过程,对熵产生 $\frac{ds}{dt}$ 才有贡献。

前面已说过,在李雅甫诺夫等人所建立起来的近代稳定性理论中,要判定一个体系是否处于稳定态,重要的是在于去找到一个描述此体系行为的微分方程组的李雅甫诺夫

函数。而熵产生 $P = \frac{ds}{dt}$ ，就是此体系的李雅甫诺夫函数。

根据我们后面要介绍到的稳定性判别原理知道，此种情况下，从对熵 S 和 熵产生 $P = \frac{ds}{dt}$ 的性质 ($S \cdot \frac{ds}{dt} \geq 0$) 来判断，孤立系在非平衡状态下是一个不稳定体系，

只能永远从非平衡态自发地转变到平衡态去，而不可能作逆转变。

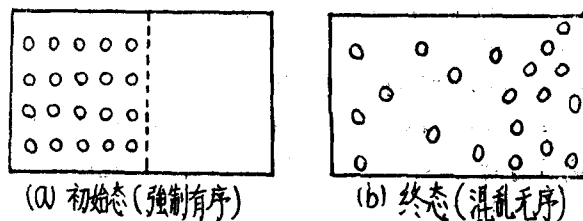
我们也可把热力学第二定律说的更通俗一些，即对非平衡的孤立系统来说，熵越低其非平衡度越高，熵越高，越接近于平衡态，而它的熵是恒增加的，当熵达于最大值时，就达到了平衡态。

另一方面，从统计力学知道，一个大量子系统组成的体系，有波尔兹曼的熵 S 函数关系：

$$S = K_B \log \bar{W} \quad (2.2)$$

其中 K_B 是波尔兹曼常数， $\bar{W}$ 是配容数。此式表明，体系的熵 S 是与配容数 $\bar{W}$ 的对数成正比的，也即高熵对应于无序化增大，而低熵对应于有序化增大。

把上述两方面结合起来可知，对孤立系来说，平衡态是高熵态，是无序的，非平衡态是低熵态，是趋向有序的。而随着时间的推移，一个非平衡的孤立系，只可能从有序转变为无序，而不可能自发地从无序转变为有序。例如，考虑一个初态是处于强加的一定有序化的孤立气体系统，把气体放在一个盒子的半边，显然，随着时间的推移，气体将很快地倾向于占据整个盒子体积，从而破坏了最初的有序状态，而转变成无序状态。这个现象是不可能自发地、相反地发生，也就是说它是一个不可逆过程（见图三）。从而证明，对非平衡的孤立系来说，不可能自发地从无序转变为有序。



图三、理想实验。占据盒子一半的一个强制有序化气体系统，会自发地迅速地占据整个盒子，变成混乱无序状态（从 a 转变到 b ）。相反的过程（从 b 转变到 a ）不可能自发地出现。

上面谈到的“非平衡可趋向有序”这个论点，用布鲁塞尔学派的语言来说，即“非平衡是有序之源”。正如引言中已指出的，这是布鲁塞尔学派在发展广义非平衡热力学和非平衡统计力学中的一个基本出发点。

（二）、平衡态“开放系”中的波尔兹曼有序原理

考虑由一个数学表面所包围的体系，它与确定不变温度 T 的外界能够交换能量（但