


·葛兰斯多夫 1·普里高津 著 ● 海彦合 张建树 江耀华 译

结构 稳定 与 涨落

的热力学理论

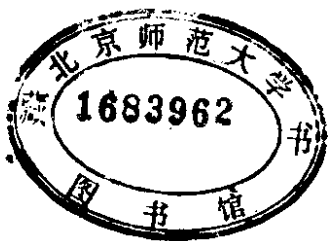


陕西人民教育出版社

结构、稳定与涨落的 热力学理论

P·葛兰斯多夫 I·普里高津 著
海彦合 张楚树 江耀华 译

JY1124/30



陕西人民教育出版社

结构、稳定与涨落的热力学理论

P·葛兰斯多夫 I·普里高津 著

海彦合 张建树 江耀华 译

陕西人民教育出版社 出版发行

(西安市长安路南段376号)

新华书店经销 洛南印刷厂印刷

850×1168毫米 1/32开本 10.75印张 270千字

1990年4月第1版 1990年4月第1次印刷

印数：1—1,000

ISBN 7-5415-1187-9/G·1037

定 价：4.25元

译者前言

献给读者的这本书是远离平衡不可逆过程热力学世界性文献专著中最重要著作。它详细地阐明了耗散结构理论的热力学基础，并应用到流体动力学、化学、生物及社会学等方面。著者作为非平衡热力学的奠基者早已闻名世界，作者之一也因他在科学上的这一重大贡献荣获1977年度诺贝尔奖金。

从热力学的观点看，耗散结构是指远离平衡的开放系统可能出现的一种稳定的有序结构。耗散是指系统与外界有物质和能量交换，而所谓结构，说明并非混沌一片，而是相对有序，或是空间，或是时间有序。耗散结构理论就是研究系统怎样从无序的初态，向稳定有序的结构组织演化的规律，并且力图描述系统在变化临界点的条件和行为。也称为非平衡系统的自组织理论。所谓自组织，因为在这样的系统中并无谁来发号施令，进行综观全局的统筹协调，但它们却自我组织，自我调节，形成一种具有调节功能的有序系统，也就是耗散结构。

远离平衡的宏观系统中自发产生各种时空有序结构是十分普遍的自然现象和社会现象。耗散结构理论研究开放系统，而宇宙中各种系统，无论有生命的、无生命的，实际上无一不是与周围环境有着相互依存和相互作用的开放系统。因而这一理论涉及范围之广在科学史上是罕见的，无论物理、化学、生物、地学、医学、工程技术、城市建设、交通网络，或是哲学、历史、经济乃至人口发展等等，都可以应用它的研究成果。所以这一理论不仅自然科学工作者感兴趣，而且引起越来越多的社会科学和管理科学工作者的兴趣，已经运用它解决各自领域中的问题并取得了可喜的成果。

本书是作者的另一名著《非平衡系统的自组织》一书的姊妹

篇，二者是相互补充的。虽然本书出版早于“自组织”一书，出版后这一理论在某些方面又有所发展，但作为耗散结论理论的经典著作，不失其科学价值和意义，仍然值得一读和仔细研究。

本书是我们三人共同完成的，翻译过程中相互切磋，互校译文，有些地方还参照俄译本进行订正，最后由海彦合同志就译文风格、体例和术语进行统一校订。由于是新学科，有些新术语国内尚无规范译名，我们只能按原文和其它文种的译本推敲酌定。译文虽经反复校订，欠妥和错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

在本书的翻译过程中，文振翼教授、湛墨华教授、张纪岳教授、骆志勤付教授，总编赵喜民同志、责任编辑杨益同志曾提出不少宝贵意见并给予多方面的支持和帮助，译者在此谨致衷心的感谢。

译者

序 言

对力学系统的完全描述必须借助于粒子的坐标和动量，或其波函数。但是当把这种描写方法应用到我们感兴趣的化学物理、流体动力学或生物学系统，无论在实践上和概念上都将遇到巨大困难。即使我们能够设计出的计算机足够大，能够研究分子动力学问题，比如说能够处理宏观系统的 10^{23} 个分子，知道这些分子的位置、速度也毫无价值，因为我们根本无法重复做与初始状态相同的实验。

热力学方法和流体动力学方法的重要性就在于它为我们提供了对宏观系统的一种“简化描述”，或者说使用了“简化语言”。在我们感兴趣的许多情况下用这种简化描述就足够了。例如，要预言某金属块温度的变化，解带有适当初始条件和边界条件的傅立叶方程就可以了。而每一点的温度都是对大量分子取平均值的结果。傅立叶方程的预言与实验结果相吻合，这就说明对这种变化过程更细致的研究并不需要用力学量。本书的宗旨并不是分析力学描述与宏观描述的关系。这一分析只有借助多体系统的统计力学才能进行，而我们这里只涉及宏观方法。

用这种方法能进展到什么程度？哪类现象可用此方法进行研究？这就是本书将要研究的问题。

众所周知，当热力学第二定律被公式化后，经典热力学本质上从事平衡态的研究。经典热力学集中研究已达到热力学平衡的系统的性质（例如，Schottky, 1929）。特别在近二十年来，不可逆过程热力学得到了迅猛发展。这一发展的重要性在于它使宏观方法用于非平衡系统成为可能（这个课题的发展简史可参见普里高津1947年的工作）。但这一进展在本质上只限于处理近平衡区域的现象。在这个区域内，热力学力（如温度梯度、化学亲和势

等)和热力学流如(热流、化学反应率等)之间呈线性关系。

昂色格倒易关系(1931)和最小熵产生原理(1945)两者都属于这个线性非平衡热力学范畴。

今天,不可逆过程热力学这一分支已成为经典课题,并且已由许多专著充分研究过了(特别是 de Groot 和 Mazur, 1961)。

还需要进一步发展吗?有些例子充分强调了把热力学扩展到非线性区域的必要性。我们先来考虑化学反应的情况。如所周知,若反应速率足够缓慢,对各组元的麦克斯韦平衡分布实际上没有扰动,就可用各组元的平均浓度进行宏观描述(更详细的情况,比如可参见普里高津,1967)。一般说来,所得到的化学反应率和化学势合势之间的关系,仍然是非线性的。

另一个宏观方法业已成功应用的另一个重要研究领域是流体力学。我们特别感兴趣的是流体力学的稳定性理论。众所周知,某些简单的流体花样(如泊肃叶流)仅在一定的参数范围内才出现,超出这个范围,就变得不稳定了。

作为一个简单的例子,我们考察一个自下加热的水平流层中的热稳定性问题。这就是所谓的贝纳德(Bénard)问题,我们将在本书第十一章和第十二章里详细研究(chandrasekhar, 1961)。当所谓瑞利数的无量纲参数达到某一临界值时,静止的流体变得不稳定,开始了蜂窝状的对流。而高于或低于这个参数值时,流体可用宏观方法来描述。此时热力学的研究对理解这种不稳定性的位置 and 含义具有非常重要的作用。

因此,我们研究的核心问题是:能否把热力学方法加以推广,去处理从平衡态到非线性情况及不稳定性的整个范围内的现象?

我们将会看到,如果描述局域熵可以用和系统处在平衡状态时相同的独立变量来表示,那么推广到各种类型的现象的确是可能的,这就是“局域平衡假设”,这个假设成立意味着使系统

趋于回复到热力学平衡态时的碰撞效应占优势。换句话说，无论什么时候，分子速度或相对位置的分布函数，都不能远离它们的平衡形式（第二章§2）。这个条件应该视为应用热力学方法的充分条件。十分有可能在较少的限制条件下建立统一的热力学方法。然而我们这里不探索这种可能性。

即使有这样的限制，上面提到的推广也将在本质上扩展宏观处理方法的应用范围。用完全不同的方法处理的各种问题，现在都可以用这种新的统一观点进行研究。甚至某些经典的平衡态热力学问题，一旦在这种更普遍方法的框架下处理，也能得到合乎自然规律的答案。

任何一种理论，只要它的目的在于描述远离平衡条件下（例如在热力学分支稳定性范围之外）出现新的物质组织的可能性，都不得不凭借涨落理论。纯粹的因果描述，甚至对于自由度数很大的系统来说也不再是充分的了。作为例子，考虑流体力学中的一个典型问题：流体的层流稳定性。设动能中有一个小涨落 δE_{kin} 。这个涨落对应于在速度剖面图上将有一“小峰”，如下图所示。



速度涨落的剖面图

如果当 $t \rightarrow \infty$ 时 δE_{kin} 处处为零，则流动是稳定的。相反，假如 δE_{kin} 随时间而增加，那末将到达一个新的流动状态。从经典流体力学得知，如果雷诺数超过了临界值，这一情况相应

于形成湍流。

因此，我们的观点是：一个新的“结构”总是不稳定性的结果。它起源于涨落。但是，在通常条件下涨落引起的反响，将使系统回复到非扰动状态。反之，在形成新结构的地点，涨落增大。当然，这一点是经典稳定性理论的基础，是从简正模分析引伸而来的（例如，chandrasekhar, 1961）。我们研究在稳态附近满足线性演化方程的小扰动。每个简正模与时间的关系具有 $\exp \omega t$ 的形式，一般来说这里的 ω 是复量 $\omega_r + i\omega_i$ 。这时，稳定性条件是对每个简正模都意味着：

$$\omega_r < 0 \quad (1)$$

我们的主要课题之一就是要把稳定性理论与不可逆过程热力学联系起来得到尽可能多的信息，而与详细的简正模分析无关。显然我们必须用某种方法，在热力学描述中引入系统对涨落的反响。换言之，我们必须建立一个包含涨落的宏观理论的广义热力学。

我们必须强调，涨落的起因既有外部的，也有内部的。例如，它可能来自边界条件的瞬时扰动。但在具有多自由度的宏观系统中，就自动包含有自发涨落。因而，一个给定过程的稳定性条件就变为涨落衰减的条件。

自发涨落的反响问题与经典热力学中著名的“勒夏忒列-布劳恩原理（或称调节原理）”有紧密的联系。这个原理宣称（普里高津和Defay, 1954, 第十七章）：

“任何处于化学平衡的系统，如果支配平衡的诸因素中有一个发生变化，它就会使系统在相反方向产生一个变化，以补偿这个变化的影响。”

在平衡情况下，用于强度变量（压力，温度、摩尔分数）时，调节原理很容易被证明。

但是当我们把调节原理用于非平衡态时又将怎样呢？

开始讨论这类问题是论证最小熵产生定理（普里高津，

1945)。当用最小熵产生表征稳态时，涨落将完全像热力学平衡态中那样衰减，而且调节原理也满足。

正是这个流体动力学不稳定性本身的存在，表明对远离平衡的状态这一结论不再满足。我们把宏观物理学一个最基本的问题归结为：在怎样的条件下，我们才可以把平衡态热力学或线性非平衡态热力学的结果外推到远离平衡态？更明确地说：不稳定现象的普遍特性是什么？它们在耗散系统中出现的可能性有多大？这种转变后系统又是怎样组织的？

经典热力学已经解决了平衡系统中随机性和有组织之间的竞争问题。但是在远离平衡态时又将发生什么情况呢？在那里我们能否找到通过与外界相互作用而稳定的新组织、新结构呢？

从宏观观点来看需要区分两类结构：

(a) 平衡结构

(b) 耗散结构

平衡结构能够用可逆变化来建立和维持，可逆变化意味着系统对平衡态没有可察觉的偏离。晶体是平衡结构的典型例子。耗散结构的状况大不相同：它们是通过在非平衡条件下能量和物质的交换而建立和维持的。自由对流时形成的元胞花样（第十一章）就是耗散结构的典型例子，我们可以把对流元胞视为由边界条件确定的能流和物质流所稳定的巨涨落。

我们将会看到，这样的耗散结构，在完全确定的条件下，在包含化学反应的体系中存在（在第七、十四——第十六章专门讨论）。

包含着宏观涨落理论的热力学理论的思想是根据爱因斯坦涨落理论而来的。更确切地说，既可用于平衡，又可用于非平衡的宏观变化（第八章）的广义爱因斯坦理论指出，要研究的基本量是熵的“曲率” $\delta^2 S$ 。对于孤立系和小涨落，这个量与爱因斯坦考虑的熵的二次变分是等同的。但是，其重要的特点是在更普遍的条件下， $\delta^2 S$ 仍保持着明确的物理意义。

在整个局域假设有效的宏观物理范围内， $\delta^2 S$ 或者它的包含惯性效应的直接推广形式，是一个负定的二次函数。

涨落的衰减问题，或者等价的调节原理的有效性问题的，都归结为研究 $\delta^2 S$ 随时间变化。显然这种方法与李雅普诺夫稳定性理论的基本思想是相应的（例如，参见La Salle和Lefshetz, 1961, Pars, 1965）。

众所周知，非平衡热力学的基础是熵平衡方程：

$$dS = d_e S + d_i S \quad (2)$$

其中

$$d_i S \geq 0 \quad (3)$$

这里 $d_e S$ 表示外界的贡献（熵流），而 $d_i S$ 是来自系统内部不可逆过程所引起的熵产生。 $d_i S$ 可以用不可逆过程的速率和相应的力表示。现在我们希望超出方程（2）的范围建立一个可给出 $d\delta^2 S$ 的关于 $\delta^2 S$ 的新平衡方程。相应的源项我们称之为“超熵产生”，具有基本的重要性。只要超熵产生是正号时，系统就是稳定的。人们发现在平衡态附近，这个条件恒被满足。而这时满足福夏列夫-布劳恩原理，因而涨落也是衰减的。然而在远离平衡态时就不再是这样了。在相当于稳定和不稳定之间转变的临界状态，超熵产生为零。这样一来就能在更普遍的意义研究不稳定性的物理含义*。

我们会看到，这里发展的方法综合了各种不同的观点：强调了平衡方程（如线性非平衡热力学那样）；经典的热力学稳定性理论；李雅普诺夫稳定性理论以及推广了的爱因斯坦涨落公式。所有这一切都对构成一个统一的宏观物理的处理方法作出了贡献，既包含可逆过程，也包含不可逆过程，而在不可逆过程中还包含了近平衡和远离平衡两种情况。

值得注意的是在G. N. Lewis (1931) 的一篇非常重要的论

*至少对未受扰态和受扰态可用宏观方法描述。

文中，提出了统一涨落理论和热力学见解。但他只关注平衡态的情况，此时涨落通常是可以被忽略的（临界现象除外）。

在介绍本书结构以前，我们想提及我们的另一些主要研究成果。我们导出了一个在固定边界条件下，对宏观系统的任何变化均适用的普遍不等式。鉴于它高度的普适性，我们称之为“普适”发展判据（第九章）。通常这个判据以非恰当微分的形式出现，这意味着不存在与此有关的经典意义上的热力学势。然而，可以用广义概念的热力学势，这就是所谓“局域势”（第十章）。局域势方法的主要特征是每个未知数（例如在非线性热传导的温度分布）都出现两次：一次作为平均量，另一次作为涨落量。因而使经典变分技术推广到非自伴问题。若平均量与最可几量相等时，则局域势取最小值（在泛函意义上）。

在第十章中，介绍了局域势方法用于逐次逼近的收敛性问题，而在第十二章讨论几个用局域势法解决稳定性问题的例子。

为使本书能自成体系，我们在第一——四章中编入了许多平衡热力学和线性非平衡热力学的重要结果。其中包括守恒定律，热力学第二定律，线性非平衡热力学的基本定理（例如昂色格关系），最小熵产生原理，以及经典的吉布斯—杜亨稳定性理论。介绍这些原理的目的是，想让读者不必参考其他文献就能理解最新的发展成果。

第五——七章讲把经典热力学的稳定性理论推广到平衡和非平衡条件下的情况。值得注意的是，即便对于平衡条件，经典理论的应用范围也只限于处理少数热力学势最小值存在的情况（例如给定体积和温度的系统）。在许多情况下，已知的正是确定的边界条件，而不是系统内部的一些热力学量的数值。通常，没有热力学势的极小值可以利用，因而我们必须首先发展一种新的处理稳定性问题的方法（第五章），然后把它推广到非平衡情况。前面已经提到，这种处理方法的基本结果就是引入了所谓“超熵产生”。这个量的符号对其涨落而言，直接与非平衡过程的稳定性

有关。

在第八章讨论爱因斯坦涨落理论的推广。在本书研究的宏观理论中，为探讨稳定性，是以稍微有些特别的方式引入涨落的。这种处理方法有一些严重的缺点。例如它不能估算从一个稳态到另一个稳态的时间延迟。此外，在上述转变点的邻域，因涨落很可能增加到超出正常水平很多，而像化学动力学方程那样的“平均值方程”仅仅对应于第一级近似。

这是些很有趣的问题。我们正在积极从事这方面的某些研究，在不久将来的出版物中，我希望能超出在第八章、第十四——十六章中所叙述的几个初级成果。

本书序言中曾提到过的“普适发展判据”和“局域势”的概念在第九——十章中研究。

第十一章——十六章专门介绍应用。因为这个理论对许多问题都适用，我们只想举几个例子来说明某些典型特征。在第十一章中从热不稳定性一类的流层的稳定性问题（贝纳德问题）开始。然后从我们的热力学稳定性判据直接导出对贝纳德问题的变分原理，这与Chandrasekhar和其他人从简正模分析导出的结果相同（Chandrasekhar, 1961）。我们认为，这说明了我们的方法在热力学和流体力学方法两者的研究上达到的统一程度。

在第十二章中，我们讨论了更为复杂的流层中的稳定性问题，例如层流的不稳定性问题，流和热陡度对稳定性的相互影响问题。这也可以作为局域势方法的典型例子。

第十三章研究一类十分特殊的问题，主要是研究在理想流体中有限振幅波传播的稳定性问题。要点是，一般超熵产生（更严格地是包含惯性效应的推广形式）表现为正定或负定函数。因此我们可以不管临界状态的性质解决稳定性问题。我们举了可能是不稳定的时间相关演化的例子（压缩波）。因此存在这样的情况，虽然宏观物理（这里是波的传播）的偏微分方程的解是正

确的，却并不对应于稳定的物理状态。

第十四——十六章致力于开放化学系统的研究。在我们看来，这一研究特别有意义，因为有许多意想不到的特性，而且这些结果与生物学问题有直接关系。

在远离平衡态时，我们可以获得在稳态附近的时间振荡，也可以得到不稳定态，或者每个都有一个稳定范围的多重稳态。振荡问题在第十四章研究。化学振荡的第一个模型是很早以前由洛特卡（1920）和伏尔特纳（1931）引入的。但只是到了最近几年，特别在生化反应领域，才积累了大量关于低频化学振荡的资料可资利用。

在第十四章中着重指出了存在两类化学振荡。第一类是相应于“热力学分支”的振荡。这是在洛特卡—伏尔特纳模型中实现的情况。更明确地说，这个模型对应于化学亲和力无穷大的极限情况。另一类是超出热力学分支的临界稳定性之外的振荡。于是就导致了使用Poincaré在理论力学中引入的“极限环”概念（1892）。这些极限环很有价值，它为我们提供了一个不可逆过程产生时间有序的美妙例子。

第十五章研究导致空间结构的化学不稳定性。这种“对称破缺不稳定性”具有特殊的意义，因为在其空间有序及其功能两种意义上产生自发“自组织”现象。在这方面我们得到一个对应于低熵值的耗散结构的典型例子。当系统与外界有部分能量和物质交换以建立宏观的内部有序时，就可以出现这种情况。

现在，这种耗散结构的存在，已被计算机实验和实验室实验所证实（Busse, 1969, Herschkowitz, 1970）。在远离平衡态时，化学反应可以补偿扩散影响，从而建立宏观水平的组织结构。这是个具有头等重要性的事实，它很可能为经典热力学开辟了一个新的前景。

此外，在远离平衡状况下获得不稳定性的必要条件与维持生物活性的重要生化反应的机理是一致的（普里高津，Lefever，

Goldbeter和Herschkowitz, 1969)。

另一个吸引人的地方是开系在远离平衡时的稳定态数急骤增加。在第十六章研究某些例子。而且这种推广对生物应用有重要意义。作为一个例子，我们研究了Blumenthal, Changeux和Lefever (1969) 提出的膜激发模型，在这种模型中，合作行为与远离平衡的不可逆过程共同导致了一种新型的“耗散”相变。

所有这些结果都表明，确实有充分的理由说耗散是时间和空间有序之源。这种研究有可能在某种程度上把生物学和理论物理两者之间迄今存在的鸿沟缩小，但要填补起这个鸿沟还是十分困难的。在远离平衡及超出不稳定性的范围时*，我们确实得到一个由给定的自由能流产生的新的物质状态。难道生物过程属于这种状态吗？这是一个十分复杂的问题，为解决此问题需要新思想和进一步研究。至少今后毫无疑问会看到在重要的生物过程中必然包含有超出不稳定范围的情况，因而我们不能单纯用热力学平衡外推来解释。

本书包括三部分：第一部分（一——九章）讲述一般理论，第二部分（十——十三章）讲变分技术和流体动力学的应用，第三部分（十四——十七章）讨论化学系统中的不稳定性。如果主要是对最后一部分中关于在生物学中应用特别感兴趣的读者，可以略去第二部分。

法国哲学家Heuri Bergson (1907) 称热力学第二定律是自然定律中最“抽象”的定律。不论这是赞誉还是批评，这种评论同样也适用于我们在本书中发展的“广义热力学”。

经典热力学本质上是关于“结构破坏”的理论。我们甚至可以把熵产生看作是这种破坏“速率”的量度。但是，经典热力学必须用某种方式补充“结构产生”理论上的不足。

我们看到，这种方法中除了引进熵产生之外，还引入了“超

* 作者所指的是远离热力学分支稳定性极限之外的状态。——俄译本校订者注

熵产生”，看来这一基本量的特性可以表征新结构的出现及其稳定性。在化学反应中，我们将看到，这种稳定性是取决于动力学和热力学量的综合相互作用。目前没有任何一种描述可以完全不依赖动力学建立。因此必须研究特殊类型的化学反应（如单分子反应系统，交叉催化反应）。从而存在各种各样的可能性。这与经典热力学描述的系统趋向平衡的普遍性质大不相同。

但是这一多种可能性看来正是描述远离平衡的各种情况所必需的。能流可以组织系统并减少系统的熵（如前面提过的对称破缺不稳定性情况）。在另一些情况下，能流也可以增加系统的熵。同样能流可以像贝纳德不稳定性中那样，由于增加一种新的耗散机制而增加或者减少系统的熵产生。本书中我们将研究所有这些情况的例子。

在诸如生物学、经济学、社会学等广阔的领域里都强调了稳定性理论的重要性。援引P·Weiss (1968) 的话说：“把细胞视为由大小不同的许多部分构成的整体，其规律性可客观地描述如下：系统作为一个整体的行为是随时变化的，而这种变化与各部分的瞬时行为大致相等”。

这一观点既可用于细胞，也可以用于人类社会。不管其稳定性如何，状态变量的变化就会产生新的组织形式。

我们现在涉及的所有情况，同经典平衡热力学研究的情况相比，更接近于非平衡条件。无论我们考虑的情况是一个细胞或一个社会，它与周围介质都要发生相互作用，因而能量和物质的交换是本身存在的一个基本因素。

因此可以希望，在本书中我们发展的远离平衡的方法，可以作为一种接近于统一处理各学科广泛领域的基础。

大家知道，“有序”问题的最详细的分析是在平衡情况下的物理学中进行的。但在这里必须把这个概念扩展到非平衡情况去。要想借用P·Weiss引入的表达方式，我们必须研究“分子生态学”，借助于群体动力学来分析有序问题，并将其与平衡系统

的有序加以比较。这种有序和几率两者的关系与平衡时完全不同。在热不稳定性产生的原胞花样中，宏观分子数在宏观时间内完全协调运动。在平衡情况下，这将对应一个比任何我们可能想象到的几率更小。

然而，甚至这种系统的时间演化也必须用新的术语来描述。我们曾强调过涨落和不稳定性之间的关系。因此现在系统的演化包含决定论和统计两个方面，至少从宏观观点看来，包含着一些在本质上是非决定论的特征。

通过区别可逆和不可逆过程，经典热力学已经对时间概念加进了一个新因素。现在还要加上另一个新的因素，即关于连续不稳定性历史。这样系统获得了一个“历史”尺度。它们的状态不再能用给定时刻的变量值来表征，而需要知道系统以往出现的不稳定性的顺序。生物学系统就是这样传递它们的信息的。这不就是与“历史尺度”有关的最低限度的信息吗？

对于这些诱人的问题，我们觉得自己才刚刚起步。虽然如此，我们将看到，沿这些线索已可以讨论某些特殊例子。

当然热力学中最吸引人的特征之一仍然是它的普适性，把大量的现象归结为几个基本观点。我们在本书中也试图遵循这个传统。

我们衷心感谢：布鲁塞尔的R·Balescu教授，华沙的B·Baranowski教授，巴黎的J·P·Changeux教授，J·Chanu教授，以色列雷霍沃特的A·Katchalsky教授，俄勒冈州尤金的R·Mazo教授，班加罗尔的R·Narashima教授，布鲁塞尔的G·Nicolis教授，纽卡斯特尔的P·H·Roberts教授，得克萨斯州奥斯汀的R·S·Schechter教授，布鲁塞尔的G·Thomae教授，印第安纳州诺特德的W·Strieder教授。

我们感谢下列博士的研究成果：A·Babloyantz, N·Banai, M·Goche, A·Goldbeter, J·R·Hamm, M·Herschkowitz, R·Lefever, J·Legros和来自布鲁塞尔我们课题组的J·Platten,