郝柏林

世界是必然的还是偶然的

——混沌现象的启示

冥冥有手写天书，彩笔无情挥不已；
流尽人间泪几千，不能洗去半行字。

——奥玛伽音[1]

这里波斯大诗人奥马珈音(Omar Khayyam, 1048～1122)说的是历史前定，人类活动无能为力改变它的进程。处于另一极端的英雄史观，则强调自由意志的作用，从而赋予历史发展以依赖于个人特色的随机性。前定与随机，必然与偶然，向来是人文科学中长期争论不休的命题。另一方面，自然科学理论始终受实验和观测的检验，而它的每个重大发展又都会反馈到文化层次，对人的哲学和历史观有所启示。近二十年来混沌(chaos)运动的研究，正在改变着数理科学工作者对决定性和概率性描述的认识。本文拟将这方面的革命性发展作简短介绍，并就混沌研究的启示，略抒孔见。

决定性和概率性描述

对于同一个自然界，物理科学中有决定性(deterministic)和概率性(probabilistic)两种描述。在牛顿(Isaac Newton, 1643～1727)创立古典力学之后250年间，直至本世纪20年代为止，决定论长期处主导地位，基于概率论的统计描述，原则上只能视为不得已情况下所采用的辅助手段而已。

牛顿在1687年初版的《自然哲学的数学原理》一书中，完整地表述了他的绝对时空观，运动三定律和万有引力定律，演绎推导出开普勒(Johannes Kepler, 1571～1630)的行星运动三定律。《原理》第三篇讨论了"宇宙系统"(其实那只是到土星为止的太阳系)。后来，在1799～1827年间出版的拉普拉斯(Pierre-Simon de Laplace, 1749～1825)五卷《天体力学》巨著中，运用牛顿力学于太阳系行星及其卫星的轨道计算，臻于极精微的程度。拉普拉斯甚至宣称，只要给定了起始条件，就可以预言太阳系的整个未来。

这就是所谓机械决定论(mechanistic determinism)的观点，即应用牛顿所发现的诸定律，可以精确计算天体的运动，所以，通过精确的物理定律，宇宙目前的状况原则上也就全部"决定"了它以后的发展。这种机械决定论观点，因为海王星的发现而登峰造极。

原来自1781年确认天王星之后，就发现它的实际轨道总是不规则地偏离计算结果。许多科学家想到，这可能是由于一颗更遥远的未知行星的扰动，法国天文学家勒威耶(Urbain-Jean-Joseph Le Virrier)运用天体力学精确预言了新星的位置。1846年9月23日夜德国天文学家伽勒(Johann Gottfried Galle)就在预言的位置一举发现了这太阳系的第八颗行星。尽管英法两国为了它的优先发现权和命名而进行了一场颇动感情的争论，这个大发现使得决定论的成功似乎并无异义了。

然而，事情并非尽善尽美。19世纪末叶已经知道，描述三个或更多天体运动的方程组不可积分，更不能解析地求解。太阳系能否永远地稳定运行，也是悬而未决的难题。换言之，理论上已准确决定了的事情，事实上还不一定能用已知的数学方法展示出来。"未知"还是现实的一部分。

就在机械决定论取得辉煌成就的同一时期，蒸汽

郝柏林，中国科学院数理学部委员，理论物理研究所所长，北京100080；本刊编委会副主编。

Hao Bailin, Director, Institute of Theoretical Physics, Division Member of Mathematics and Physics, Chinese Academy of Sciences; Co-Editor in Chief of *Science* (*Kexue*).

机和内燃机的发展把对气体性质的研究提上了日程。人们使用压力、温度、体积这些宏观概念，寻求它们之间的经验规律，终于建立了热力学体系。基于大量实验事实的热力学诸定律，起着宏观世界根本大法的作用。流体力学的方程组，也是为类似的宏观变量建立的。然而，为了从大量原子分子运动和相互作用出发，推导气体的宏观性质或流体力学方程，那就必须引入这些粒子(实际上无从一一测定的)位置、速度分布的概率假设，并运用统计方法。所以，概率性观念就成为必须的了。

湍流(turbulent flow)是人类世世代代寻常惯见的现象。从1883年雷诺(Osborne Reynolds, 1842～1912)引入无量纲的特征数(雷诺数)对圆管中液体流动进行定量研究开始，积累了各种物理和几何条件下平稳流动如何突然转变成湍流的观测资料。但流体力学的基本方程是基于光滑和连续概念的决定性偏微分方程组，它们怎么能描述似乎没有规则的湍流？湍流的发生机制和发达的湍流状态又是怎样的？

这样，在19世纪末的物理学里，除了那些后来导致相对论和量子力学的基本矛盾之外，还在不同层次上隐含着没有解决的，关于决定性和概率性取舍的重大问题：不可积分的牛顿方程以及相关的运动图象，统计物理学的基础，湍流的发生机制和描述。然而，20世纪初相对论和量子力学的成功，接踵而至的令人眼花撩乱的技术发展，和两次世界大战对军事技术的要求，吸引了绝大多数物理学家的注意力。上述艰难的根本性问题，因此被留给数学家们去潜心研究。

牛顿力学的内禀随机性

在一切可能的力学系统之中，到底有多少是不可积分的，亦即是无从用已知的数学方式来表示它的运动形式的？20世纪40年代数学家西格尔(C. L. Siegel)等人已经给出答案：不可积分的系统俯拾即是，多不胜数，而可积可解的力学问题，却如凤毛麟角。传统的大学力学教科书挂一漏万，并没有描绘出牛顿力学的真面目。

但不可积分的力学系统的典型运动图象究竟是甚么样子的呢？这是极为困难的数学问题。直到KAM定理(由A. N. Kolmogorov在1954年提出，由V. I Arnold和J. Moser分别于60年代初证明，因而得名)出现，这问题才算有了实质进展。粗略地表述出来，KAM定理好像颇为平淡。它说：在一定条件下弱不可积系统的运动图象与可积系统差不多。可是这时物理学家手里已经有了新式武器——电子计算机，能够突破解析方法的局限，对KAM定理的条件大作反面文章了。结果完全出乎意料。原来，只要破坏定理所假设的任何一个条件，运动都会变得无序和混乱。当然，这时运动所遵循的，仍然是决定性的牛顿力学方程式。也就是说，只要精确地从同一点出发，得到的仍是同一条确定的轨道。然而，只要初始条件有无论多微小的改变，其后的运动就会失之毫厘，差之千里，变得面目全非。还有几个经过严格数学证明的实例，说明某些牛顿力学刻划的运动，实际上可能同掷骰子所得的一样，是随机(random)和不可预测(unpredictable)的。

一个典型的不可积分的力学系统，通常兼有规则运动和随机运动的两种不同区域。随着某个参数(譬如代表作用力强度的参数)的变化，随机区域可能逐渐扩大，终至并吞掉规则运动的区域。我们甚至可以严格地定义在规则运动区域中等于零，而在随机运动区域中大于零的特征量(这称为Kolmogorov熵)，来量化运动的随机程度。规则运动是“简单的”，随机运动是“复杂的”，现在可以定量地区分“简单”和“复杂”运动了。

因此，决定性的牛顿力学从计算和预测的观点来看，实际上具有内禀随机性(inherent randomness)，这就是微观层次(即个别粒子，或所谓无内在自由度的个体的层次)上的混沌运动。

湍流和奇怪吸引子

现在我们回到宏观层次(即由许多粒子形成的群体的层次)，看湍流问题。湍流现象普遍存在于行星和地球大气、海洋与江河、火箭尾流、锅炉燃烧室、乃至血液流动等自然现象之中。它的困难之处固然在于流体运动有无穷多个自由度，可如果事情只限于大、中、小、微各种尺寸的旋涡层层相套，运动能量错综复杂地由整化零，那么统计描述仍可能奏效。问题在于，湍流是经过一次或多次突然转变而形成的，而在紊乱无规则的背景上往往又会出现大尺度、颇为规则的结构和纹样，出现协调一致的运动。即使撇开湍流的空间结构不谈，决定性的流体力学方程怎么能允许貌似随机运动的紊乱的时间行为？

1963年麻省理工学院的气象学家洛伦茨(E. N. Lorenz)研究对天气至关重要的大气热对流问题。他大刀阔斧地把包含无穷多个自由度的偏微分方程砍成只剩三个变量的常微分方程组，放到电子计算机上去。他发现即使对这样一个经过极度简化的系统来说，大气状况起始值的细微变化，亦足以使非周期性的气象变化轨道全然改观。这一后来使洛伦茨成名的发现，当时却发表在鲜为人知的《大气科学杂志》[2]上。洛伦茨本人当时却已经意识到，这种普遍存在的气象变化轨道的不稳定性，会使长期天气预报的希望幻灭。他

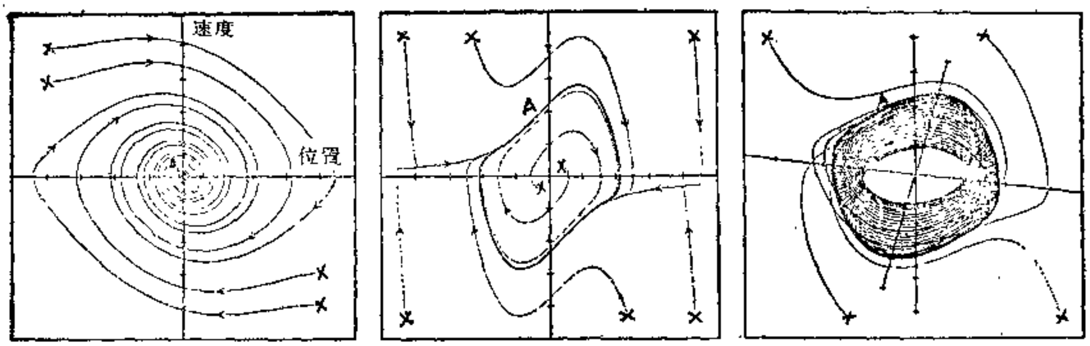

图1 前此熟知的有规则、可预测的运动轨迹。左图是有阻尼单摆在位置和速度所构成的相空间的运动轨迹，它的吸引子是定点A，即无论起始状态（以×代表）如何，它最终都在中央静止；中图是钟摆的轨迹，吸引子A是稳定的极限周圈；右图是复振动在三维空间的环形吸引子A。

曾以夸张的口吻，讲到“蝴蝶效应”：南美洲亚马逊河流域热带雨林中一只蝴蝶，偶然扇动了几次翅膀，所引起的微弱气流对地球大气的影响，随时间的增长可能并不减弱，而是两周后在美国得克萨斯州引起一场龙卷风。我们在后面再继续谈这个问题。

1975年数学家茹厄尔（D. Ruelle）和塔肯斯（F. Takens）建议了一种湍流发生机制，认为向湍流的转变由少数自由度决定，经过两三次突变，运动就到了维数不高的奇怪吸引子（strange attractor）上。这里所谓吸引子（attractor）是指运动轨迹经过长时间之后所采取的终极形态；它可能是稳定的平衡点，或周期性的轨道；但也可能是继续不断变化，没有明显规则或次序的许多回转曲线，这时它就称为奇怪吸引子。奇怪吸引子上的运动轨道，对轨道初始位置的细小变化极其敏感[3]，但吸引子的大轮廓却是相当稳定的。他们两位当时并不知道奇怪吸引子的实例，是另一位数学家约克（James A. Yorke）发掘出洛伦茨的论文，也是约克在玻尔兹曼（Ludwig E. Boltzmann, 1844～1906）之后90年把“混沌”（chaos）一词重新引进科学语汇。

约克绘制的洛伦茨吸引子是一条连续而光滑的轨道，它以看来相当随机的方式，在左右两翼中转圈。如果稍稍改变一下轨道初值，左右跳动的顺序和次数就会完全不同。

对初值的敏感依赖性，是在奇怪吸引子上的运动轨道的主要特征。在各种决定性的宏观方程中，由于能量耗散而使有效的运动自由度减少，最终局限到低维的奇怪吸引子上。这就是宏观层次上的混沌运动。作者和北京师范大学胡岗发现的另一组微分方程中的奇怪吸引子，形状像是数字88的依稀相联的两片。由不同初值的40条轨道组成，如果只画一条轨道，计算时间延长40倍，也得到轮廓大致相同的吸引子，这就是所谓遍历性（ergodicity）。遍历性是奇怪吸引子的另一特征。

其实，混沌运动可以发生在比微分方程更为简单的模型中。

来自简单模型的复杂行为

简单原因可能导致复杂后果，这是混沌研究所提供的一条重要信息。许多看起来杂乱无章、随机起伏的时间变化或空间图案，可能来自重复运用某种极简单而确定的基本作用或元（elementary）作用。我们看两个例子。

第一个例子是不同代的昆虫数目变化。假定成虫

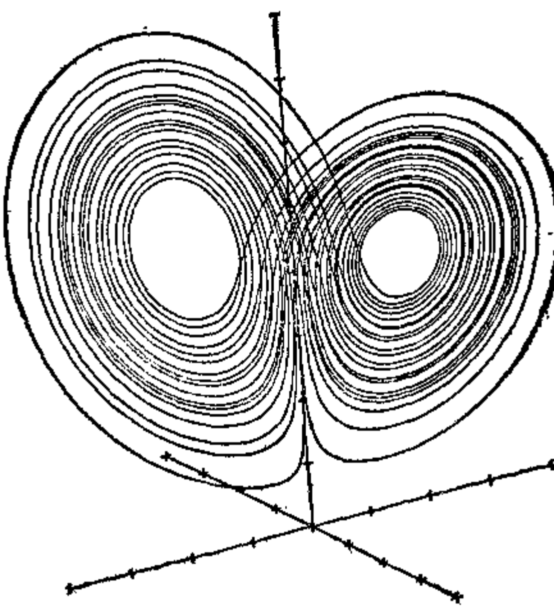

图2 约克绘制的洛伦茨吸引子的图象：这是一条在三度空间似乎无序地左右回转的连续光滑曲线。它并不自我相交（在本平面透视图中这一点不容易显示），并呈现极复杂的纹样。这是最著名的一个奇怪吸引子。

产卵后全部自然死亡，然后孵化出下一代，世代之间没有交迭。如果下一代虫口数简单比例于前一代虫口数，那么只要平均产卵数多于1，过不了多少代整个地球就会虫满为患。这正是马尔萨斯(Thomas R. Malthus)虫口论：虫口按几何级数增长。然而虫口过多，食物有限，它们就要为争食而咬斗，传染病也会因接触增长而蔓延。咬斗和接触，都是同时涉及两只虫子的事件。这类事件的总数比例于虫口的平方，而它对虫口变化产生负作用。这样，就得到一个较为现实的虫口模型：

$$y_{n+1}=Ay_n-By_n^2,$$

其中y_n是第n代虫口，y_{n+1}是第$n+1$代虫口。意味深长的非线性项y_n^2代表相互作用。其实，这种模型何只限于描述虫口变化。这是最简单，但同时又考虑了有利和不利因素，包括鼓励和约束两种作用，能够反映过犹不及的自我调控模型。它实际上只有一个独立参数，可以写成标准形式

$$x_{n+1}=\lambda x_n(1-x_n),$$

或 $x_{n+1}=1-\mu x_n^2$。

现在我们可以开始很简单地计算一代又一代的虫口变化了：给定参数λ(或μ)和初值x_0，计算出x_1，再用x_1计算出x_2，……。扔掉最初100个点(它们代表虫口尚未达到稳定态的过渡期)，再把其后的300个x_n画出来，就得到分岔图(bifurcation diagram)。图中横座标是参数λ(或μ)，纵座标是x_n。它反映出两大类不同的虫口变化方式。在某些参数区域，x_n只在几个点之间周而复始地跳来跳去，特别在图的左侧，有一个1、2、4、8、……点的倍周期序列。不管初值如何改变，周期点的数值始终不变。这是对初值不敏感的周期变化区域。

在另一些参数值，主要在图的右侧，x_n在一段或几段确定的λ(或μ)区域内似乎随机地跳动。稍为改变初值，x_n所经历的具体数值就完全不同。这是对初值变化敏感的混沌区域。但即使在混沌区域之内，仍又包含有更小的周期变化区域，在其中x_n是对初值不敏感的。所以，这分岔图虽是由极简单的方程式得来，但它的结构则是极度复杂的。

我们的第二个例子是最简单的元胞自动机(cellular automaton)：取若干枚硬币排成一行。每枚硬币可能正面向上，也可能反面向上，这正反排列的次序，构成元胞自动机的一个状态。跟着，我们定下一条简单而确定的规则令自动机改变状态。规则可以是：每枚硬币根据自己和左右两邻的正反而决定是否翻身。这类规则的变化花样并不多，它们会导致几大类不同的发展前途。

这两个例子，都不是茶余饭后的消遣游戏。许多高维的吸引子可以通过投影而形成类似的分岔图。其中奥妙至今还未完全研究透彻。而二维和三维的元胞自动机，也已经成功地用于模拟流体运动和湍流了。

这两个例子，都是重复使用简单而确定的规则，得出绝不平庸的时间演化或空间图案。反过来说，从貌似复杂的时间、空间或时空行为，也可能反溯到原始的简单的动力学规律。事实上，我们在这方面已经取得相当成绩。混沌研究的进展，不是把简单事物弄得更复杂，而恰恰是为寻求复杂现象的简单根源提出了新的观点和方法。

混沌的数学框架

混沌不是无序和紊乱。一提到有序，人们往往想到周期排列或对称形状。混沌更像是没有周期性的次序。在理想模型中，它可能包含着无穷的内在层次，层次之间存在着自相似性(self-similarity)或不尽相似。在观察手段的分辨率不高时，只能看到某一个层次的结构。提高分辨率之后，在原来不能识别之处又会出现更小尺度上的结构。《易乾凿度》说"气似质具

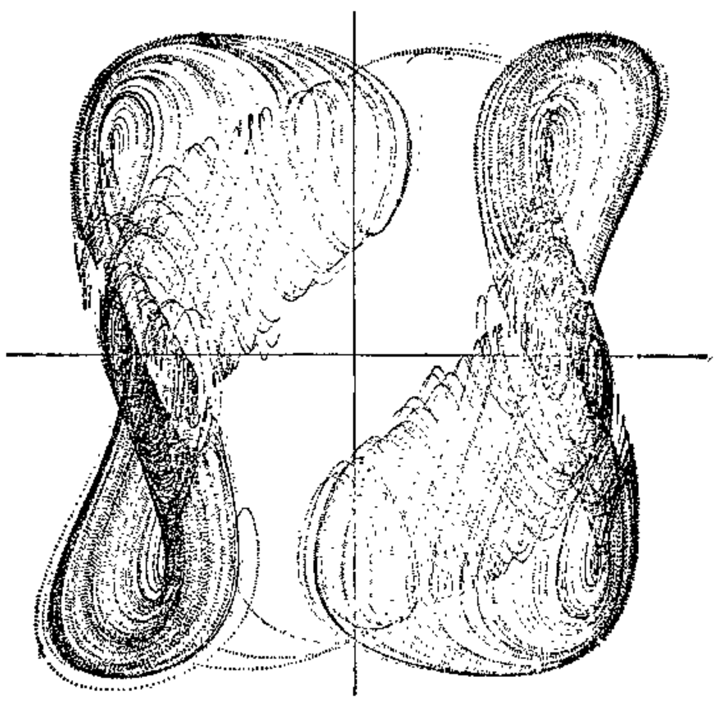

图3 郝柏林和胡岗所发现的另一个奇怪吸引子，它也是极复杂的三度空间曲线，本图所示是它的平面投影。

而未相离，谓之混沌”，看来混沌二字比英文的 chaos 更能反映这种状态。

无独有偶，数学家曼德尔布罗特(B.B. Mandelbrot)多年来苦心宣传的分形几何学 (fractal geometry)[4] 不仅是更接近自然现象的几何学，而且也正是混沌现象的几何学。零维的点、一维的线、二维的面、三维的体和四维时空，是大家所熟悉的几何对象。它们的维数(dimension) 是整数。但从 1919 年以来，数学中已经引入分数维数(简称分维)的概念。著名的实例是康托集(Cantor set)：取一线段三等分之，移去中段之后再各三等分余下的两段，然后继续移去相应的中段，这样反复运作下去，以至无穷，就得到了康托集，它是无穷多个点的集合。它的维数介于两个整数之间，可以算出来是 0.63092375……。具有分维的几何形体称为分形(fractal，这是曼德尔布罗特创造的新词)。洛伦茨吸引子正是一种分形，它的分维是2.06。而其他与混沌运动有关的图象也都是分形：混沌运动的高度无序、混乱性也反映在分形的无穷复杂性上。

混沌也不是噪声(noise)：这里所谓噪声，不但是指大街上的喧嚷，而是泛指一切来自我们所着眼的物理系统以外的微小干扰，例如地基震动、气温变化、电压涨落等等。噪声的特征在于它是真正随机，而绝对无从预测的。在现实世界中，混沌往往披着噪声的外衣出现，在我们还未曾懂得混沌现象之前，混沌不知有多少次被误为噪声而忽略了。噪声在任何实际系统中都是不可避免的，而它对混沌研究是有极重要影响的：噪声可以诱发混沌；噪声限制了我们对混沌现象的无穷内部层次的探测深度。对混沌的观察，必须满足于有限而非无穷的分辨能力。

有限分辨率带来了新挑战和新方法。假定我们无法分辨奇怪引吸子中轨道的具体走向，而只能判断它是在左半还是右半平面里转圈，那么我们对一条轨道所能判断的就成为左(L)右(R)两种字母的交替，例如

RRRLRRLLR……

这种描述丢失了无穷多的细节，但仍可能保留一些本质的信息，如周期性或混沌性。我们甚至还可以用这种办法来比较两条轨道那一条更为混沌。这种作法的数学理论称为符号动力学(symbolic dynamics)。符号动力学是在有限精度下描述复杂动力过程的严格方法。

我们已经知道，重复使用简单确定的规则可能得出极其复杂的现象。这样作时可能先要经历一段过渡状态，然后那复杂行为就稳定下来，运动(或现象)的图案纹样(pattern)可能继续翻新，但基本性质不再变化。广义来说，这也是一种定态。重复使用某种规则或变化方式以达到定态，这就是在相变和临界现象理论中行之有效的重正化群方法。它对于分析混沌现象也发挥了重要作用。分形几何学，符号动力学和重正化群三位一体地构成混沌理论的数学框架。在目前，这还不是已经完成的学术定论，而是继续研究的纲领。这套适应离散、不连续、不稳定、不可微分、处处稀疏……的形象、事物的“有限”分析 (finite analysis)，迥异于传统的基于连续、光滑、稳定、可微分、处处稠密的牛顿“无穷小”分析(infinitesimal analysis)。它是更接近现实世界的数学。

预报能力的提高

洛伦茨的蝴蝶效应粉碎了本来并不能实现的长期天气预报幻梦，但人类的实际预报能力，反因混沌研究而提高。事实上，作长期预报时，我们所关心的并不是单个具体轨道的行为，而是它平均值的变化。以天气预报为例，我们关心下星期天的晴雨冷热，但就十年后的气候而言，更重要的是耕种季节的平均降水量和平均气温。混沌研究使以往根据统计原则所作的预报，上升为动力学预报，也就是应用了似是随机现象的内在规律，从而提高了预测单个轨道近期行为的精确度，并丰富了长期预报的办法。

原来传统的预报方法基本上是统计性的，它并不假定或应用观测量本身的内在变化规律。它的办法是从观测得到的数据序列计算各种平均值和高次矩，并且与近期平均值比较。如果近期值明显偏低，则前途

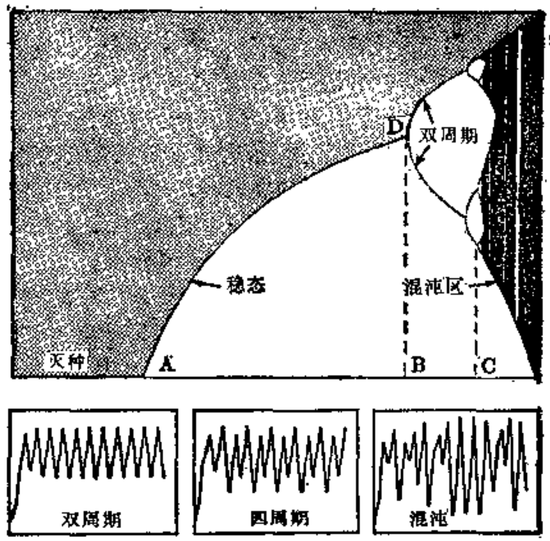

图4 生物数目变化的分岔图。图中横轴是参数值 λ，纵轴是生物数目 x_n。λ 小于A时，生物濒绝灭；λ 超过图中A点时，x_n 趋于一逐渐增加的稳态值；λ 超过B时，稳态值分岔为二，其后再分岔为多个值，x_n 则摆动于几个稳态值之间；λ 超过C时，x_n 就常常不再有稳态，而作无序跳动，这就是混沌区。

看涨，否则看落。具体作法虽五花八门，说穿了其实不过如此。

但如果预报所涉及的复杂过程背后，存在着简单的动力学机制，则混沌研究近来已经提出一些方法，可以从观测数据回过头来"重建"动力学规则，把这些推断所得的规则用到预报上去，近期预报的质量就会显著提高，它同时还可以指示当前预报质量的高低[5]。

当然，实际上是否有"气候吸引子"或"经济吸引子"，那并不取决于我们的愿望，而得要从实际数据的研究来确定。

量子混沌问题

量子力学的建立是对机械决定论的严重挑战。坚持正统决定论的物理学家，如爱因斯坦（Albert Einstein），就始终不能接受量子力学的统计诠释，不相信上帝喜欢掷骰子。然而，量子力学的统计诠释主要涉及波函数与观测量的关系，量子力学的基本方程则是完全决定性的线性方程。那么，究竟有没有量子混沌那样的现象呢？

本文迄今所讲的混沌，都发生在经典的非线性力学系统中，在微观层次上它是不可积分的牛顿方程和统计物理的基础问题，在宏观层次上它是流体力学或类似方程的湍流问题。从数学上说，则多是初值问题的长时间行为，即给定初始时刻的状态，看时间趋于无穷长时间系统是否达到混沌吸引子。在此，我们必须注意，有些混沌行为仅仅表现在过渡期间，最终它们会烟消云散，这种情况也很常见。

最直接的量子混沌问题，是取一个确切有混沌行为的经典力学系统，通过熟知的数学规则把它量子化，看后果如何。近十年来的研究表明，这类量子化了的系统中并没有混沌。即使看到一点反常现象，那也只不过是经典混沌的痕迹，并不具有量子本质。

混沌是经典系统的典型行为，量子系统的典型行为不是混沌。这一差别的深远意义，还有待进一步研究。对此，我们只提出值得思考的两点。

第一点是，德国物理学家波恩（Max Born，1882～1970）在 1955 年指出，如果用各自的自然时间尺度去衡量，微观世界比宏观世界远为长寿[6]。地球绕太阳的周期可以作为宏观世界的时间单位，所以，太阳系至今存在了大约 10^{10}年，也就是 10^{10}单位。另一方面，电子绕原子"运动"，每秒钟可以有 10^{16}或更多次的振动或回旋。所以，混沌运动似乎主要存在于"短命"的宏观现象中。

第二，我们对直接包含时间的量子力学其实所知甚少。就笔者所知，在时间趋于无穷时量子力学和经

a
b
c

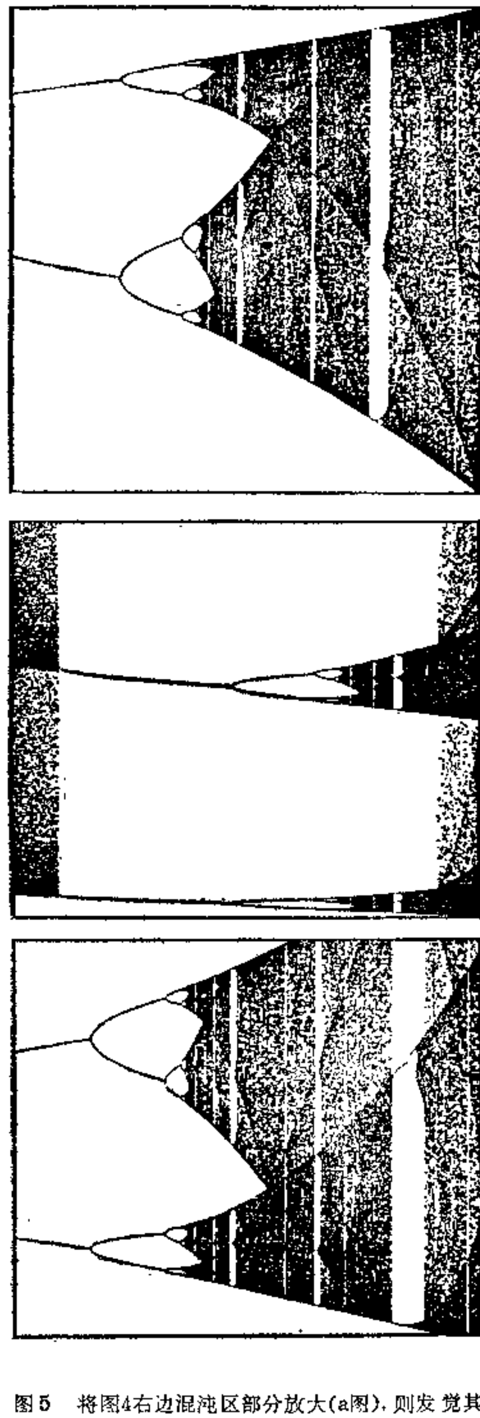

图5 将图4右边混沌区部分放大（a图），则发觉其中又包含有微小的稳态区（b 图，这是 a 图小区放大）和更复杂的混沌区（c图，这是 b 图小区放大），以迄无穷。

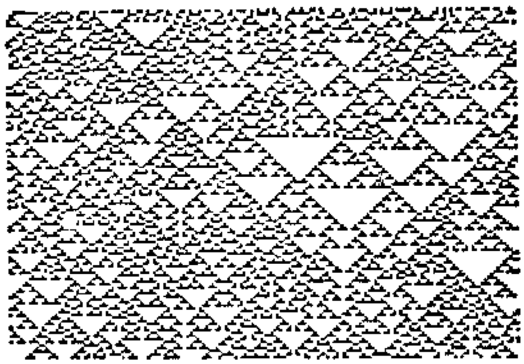

图6 由一维元胞自动机的时间序列所产生的时空混沌图案。由上而下，是依次变化之后形成的状态；从左到右，是硬币的空间排列，黑白分别代表正和反。这样的时空混沌图案，你能说它是完全随机的斑点吗？显然不能，因为它明显含有结构。然而，你能就图论事，指出其中细节的出现规律吗？显然又不那么简单！

典力学的对应问题，并未完全解决。如果有真正的量子混沌，它是否应当没有经典对应？这问题本身也还不清楚。

有限性原则

完全的决定论和纯粹的概率论，都隐含着承认某种"无穷"过程为前提。就决定论而言，它的准确轨道意味着可能以"无限"精度进行测量：有限的测量精度就不能排除轨道含有随机成分。对概率论而言，有限长的随机数序列只能以有限精度通过随机性检验，只有"无穷"长的随机数序列才可能是"真正"随机的。事实上，有限个随机数可能用决定论的过程来产生。所以，只要承认有限性，那么决定性和概率性描述之间的鸿沟就消失了，决定论的动力学可以产生随机性的演化过程。

实际上，对于世界我们只能进行有限的观测和描述。有限速度和有限"字长"的电子计算机，还有有限长的计算程序和有限的计算步骤，还有有限的计算时间，从另一方面限制了我们的描述和分析能力。而这些都和我们所能计算、描述的现象的性质发生关联。看来，我们须把有限性提升为一种原则，如何表述有限性原则，尚有待继续研究。

决定论还是概率论？二者的关系可能是非此非彼，亦此亦彼。更真实地反映宏观世界的观念应是基于有限性的混沌论[7]。

此文原载香港中文大学中国文化研究所出版的《二十一世纪》1991年第3期。中国文化研究所所长陈方正博士对原稿作了许多改进，并同意《科学》转载，作者谨此致谢。

[1] 奥马伽音．鲁拜集．黄克荪衍译，台北：启明书局，1956．第71首

[2] Lorenz E N. *J Atmosph Sci*, 1963 (20): 130～141

[3] 所谓"敏感"，是指初始位置稍有变化，所得的轨道就极为不相同。更精确地说，在奇怪吸引子上，相邻两条轨道之间的差异是随距离以指数形式增加的；否则，在普通情况下，它只是以幂数形式增加。

[4] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: Freeman, 1982

[5] 可参看：Monastersky R, Forecasting into Chaos, Meterologists seek to foresee Unpredictability, *Science News*, 1990(137):280

[6] Born M. *Physics in my Generation*. Pergamon Press, 1956. 165

[7] 对于想更多了解混沌的读者，兹推荐下列通俗著作：James Gleick. *Chaos, Making a New Science*, Viking, 1988；中译本：混沌，开创新科学．张淑誉译，上海译文出版社，1990。

跟踪・扫描

奥伯斯佯谬新解释

加拿大天体物理学家韦森(Paul S. Wesson)在今年发表的一篇理论分析文章中指出，奥伯斯佯谬主要是由于星系的有限年龄造成的。

韦森定量分析了导致夜空黑暗的两个主要因素：星系的有限年龄和宇宙膨胀。首先，如果遥远恒星所寄居的星系的年龄是有限的话，那么这些星星的辐射时间也只能是有限的。诸星系的有限年龄加上光的有限传播速度将限制观测者所能接收到的诸星系已产生的辐射量以及观测者能看到的距离；而宇宙膨胀使远方恒星的辐射向光谱红端发生频移，同时充斥着辐射的宇宙的体积却在不断地增大。韦森视星系是有效温度为6000开的黑体辐射源，并在此基础上以510纳米波长为例，计算出单位时间内单位面积单位波长间隔所接收到的来自星系的能量。他的结论是：两个因素对夜空黑暗度的影响之比约为3:1，换句话说，星系际空间的黑暗程度主要决定于星系的有限寿命和光的有限传播速度，而宇宙膨胀对辐射强度的减弱无多大影响。

韦森建议对已问世的一些天文学书刊仍用宇宙膨胀为主来解释奥伯斯佯谬的说法应给予更正。（许 槑）

3/51 0? / ...

童 建

时间生物医学工程

对生物节律和生命时间过程的探索，将在生物医学领域中开辟一个新纪元。作为这一进展的技术先导，时间生物医学工程已在分子节律研究、疾病时间治疗、自动生物采样和程序给药装置的研究等方面取得了令人瞩目的成果。

60年代，在生物学领域里诞生了一门新兴的学科——时间生物学。它主要研究生物的时间机构、生理和化学的时间过程及其调控机制。近十年来，时间生物学的方法和技术在医学领域得到了越来越广泛的应用，最终又导致了时间生物医学工程（chronobiomedical engineering）这门边缘学科的问世。尽管其历史不长，但却已经和正在对现代医学产生革命性的影响。它以生物节律为主导，在医学基础研究，疾病的诊断、治疗和预防等方面，都获得了令人瞩目的进展。

生物分子的时间节律

经典的生物学理论注重生命系统的恒定性，特别强调维持内环境的稳定是生命活动的基础。时间生物学则通过大量的观测，揭示出生物从个体到群体，在生理反应、器官功能、心理行为等方面，几乎无例外地存在着不同频率的周期性现象。按照周期时间的长短，可以分为超日节律、昼夜节律、亚日节律、月节律和年节律等。近年来，对生物节律的研究已不再局限于对现象的观察和描述，而是逐渐深入到细胞和分子水平，试图从生化反应和物质代谢方面阐明生理节律的产生和调节机理。

以对肾上腺皮质激素的研究为例。在生物化学中，已经明确这些激素的生物合成、代谢途径和各自的生理功能，其中皮质醇参与体内的糖代谢，醛固酮调节水与电解质的平衡，而脱氢表雄酮除了能合成雄激素（睾酮）或雌激素（雌酮）之外，还能在一定程度上影响人的性格。由于这些内分泌物质与体内其他系统一起构成调节网络，使得其参与的物质代谢之间形成很复杂的相互作用关系，这对于有关疾病的诊断和治疗造成了困难。最近，通过应用自动昼夜采样监测技术，已确定上述激素均存在着以24小时为周期的波动过程，但是各激素的时间变化特征不同。在睡眠相开始时，首先是醛固酮的分泌增加，但血浆浓度达到高峰；以后在睡眠的中期，皮质醇又大量产生，清晨前后出现峰值位相；而脱氢表雄酮和雌雄激素则在每天下午以后合成最多。这些激素分子的有序时间代谢过程，决定了相应的生理功能的昼夜节律性质。临床上，了解这些规律对于高血压和冠心病等的防治具有重要的实际意义。

同一化学分子在不同的时间甚至能够引起完全相反的生物效应。体外培养的成骨细胞中，在一天不同的时间分次加入相同剂量的促肾上腺皮质激素，观察其对细胞DNA合成的影响，发现在凌晨2点给药能促进DNA的合成，在下午2点给药却出现抑制作用，而在其他时间给药则呈双向效应，即先促进后抑制或是相反。这说明，机体生长和生理功能的周期现象，是建立在分子反应的节律基础之上的。

童建，医学硕士，苏州医学院卫生系讲师。

Tong Jian, Master of Medicine, Lecturer of Department of Public Health, Suzhou Medical College.