

# 令人关注的复杂性科学和复杂性研究<sup>\*</sup>

方锦清

研究员,中国原子能科学研究院,北京 102413

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(No. 70071047 和 19875080)

关键词 复杂性科学 复杂性基本特征 复杂性总根源 混沌系统 湍流系统 洁净核能系统 激光阵列

20世纪80年代兴起的复杂性科学及其复杂性研究,引起国内外的极大关注,正不断地与各种学科和领域(包括自然科学、社会经济科学和人文科学)进行广泛的交叉和融合,向新世纪科学技术提出了巨大的挑战.本文首先提出产生复杂性的总根源和新世纪科学技术面临的巨大挑战.从物理上考察分析了复杂性的若干共同的基本特征,主要表现在“十大特性”上:非线性、多样性、多层性、多变性、整体性、统计性、自相似性、非对称性(对称破缺)、不可逆性和自组织临界性.简要讨论了产生复杂性的物理机制及转变的某些方式.然后以一些典型的复杂系统为例,分析了混沌系统和湍流系统、洁净核能系统和激光阵列等复杂系统中复杂性的主要表现特点及其控制策略.最后,初议了复杂系统的可能分类方法和复杂性科学需要共同研究的一些主要内容和涉及的课题范围,指出复杂性科学今后发展的趋势.

## 一、引言

复杂性科学及其复杂性问题的研究兴起于20世纪七八十年代.当时复杂性问题的研究基本上是与非线性科学及其混沌动力学复杂性的研究结合在一起而展开的.国际上掀起非线性科学和复杂性研究的热潮,开始不断地与各种学科和领域(包括自然科学、社会经济科学和人文科学)进行交叉和融合<sup>[1-14]</sup>.在诺贝尔得主普利高津(I. Prigogine)建议下,1984年联合国大学在Montpellier举办了“复杂性科学与应用研讨会”,对复杂性问题的研究起到先导和促进作用.此后这类会议不断.国内外以非线性和复杂性命名的研究所或中心纷纷成立.1986年普利高津和他的学生尼科里斯共同以中英文出版了《探索复杂性》一书.值得一提的是,1984年由三位诺贝尔得主Murray Gell-Mann(物理)、Philip Anderson(物理)和Kenneth Arrow(经济)组建的美国圣塔菲研究所(Santa Fe Institute),是一个国际性的不同领域的科学家关于复杂性问题的研究中心.2001年该所Bak所著的关于《自然界如何工作》的中译本出版.该所开放的流动的研究人员来自各国不同学科,物理学家、经济学家、生物学家和计算机科学家等等一起共同研究感兴趣的所有复杂性问题.2001年国内出版了1991年4月联合国大学在日本东京召开“混沌对科学和社会的冲击”学术会议

的论文集.近年来,国内复杂性问题的研究受到有关部门(如国家自然科学基金委设立了复杂性科学研究专项等)重视,许多复杂性会议频频召开和会议文集出版,例如2000年成思危主编的《复杂性科学探索》等,反映了国内复杂性科学研究的可喜态势.

由于20世纪90年代混沌控制与同步取得了突破性进展,伴随着近年来混沌应用研究的迅猛展开,国内外再次掀起研究新热潮.显然,20世纪下半叶科学的发展表明:非线性科学与复杂性科学及其复杂性的研究使人类的认识产生了新的飞跃,特别是混沌的发现和深入研究大大促进了复杂性的研究进程,引起国内外的广泛兴趣和众多学科的关注.人们预计复杂性科学在新世纪将会有重大突破性进展,它向新世纪科学技术提出了巨大的挑战,同时也为人类提供了发展的极好机遇,必将展示美好的应用前景.

## 二、复杂性产生的总根源与新世纪面临的挑战

首先,复杂性科学令人关注一个最根本的问题是:世界万物的复杂性产生的总根源在哪里?我们在新世纪面临的巨大挑战是什么?

我们已经知道:宇宙大爆炸后到20世纪末的时空演化图象,以及新世纪向科学技术提出了的巨大挑

战<sup>[1-2]</sup>. 从大爆炸一瞬间开始, 宇宙一直在空间和时间上不断地膨胀, 许多科学观测证明了大爆炸宇宙学理论, 从微波辐射背景 (2.725 K) 发现、哈勃望远镜观察和地面观察站多种手段的观测结果表明: 迄今宇宙已经经历许多不同阶段, 主要有五个演化阶段, 即 30 万年、100 百万年、10 亿年、50 亿年和 120 亿 ~ 150 亿年. 由于科学观测证明了大爆炸理论是基本正确的, 已被大多数科学家所接受. 爆炸之初, 宇宙充满难以想像的高热辐射, 热得任何原子或分子无地自容. 数分钟后, 它便冷却到足够形成最简单的氢原子和 He 原子核. 数百万年后, 宇宙才冷却到足以产生一个原子, 不久又生成了简单分子的温度. 然后, 只是到数十亿年后才出现了一系列复杂现象或事件, 使得物质凝聚成恒星和星系, 以后又生成了稳定的行星环境. 在地球这个行星上发生了目前我们还不清楚的那些过程孕育了种种复杂的生物化学产物. 目前我们看到的只是大爆炸后宇宙向外扩展 94% 的距离而已, 它还在不断地膨胀中. 太阳、地球、生命和人类全部来源于这个宇宙的复杂的时空演化. 由此可以认为, 宇宙大爆炸后造成的巨大的时空复杂性是世界万物复杂性产生的总根源.

值得一提的是, 诺贝尔奖得主李政道 2001 年 10 月 7 日在题为“物理学的挑战”的报告中指出了 21 世纪物理学面临的四大挑战性问题<sup>[15]</sup>: 理论对称性但实验结果不对称性. 夸克禁闭问题: 一半的基本粒子不能单独存在, 是看不见的; 而不对称性的真空能禁闭夸克. 全宇宙 90% 以上的物质是暗物质问题. 类星体问题: 每个类星体的能量约为  $10^{15}$  个太阳的能量. 他从物理上分析认为, 因为大爆炸后真空状态发生根本的变化, 爆炸时宇宙处于真空对称态, 但是大爆炸后物理的真空发生变化, 出现了现在的真空态不对称性状态. 这就从物理观点上可以说明产生人们不了解的复杂现象的一个重

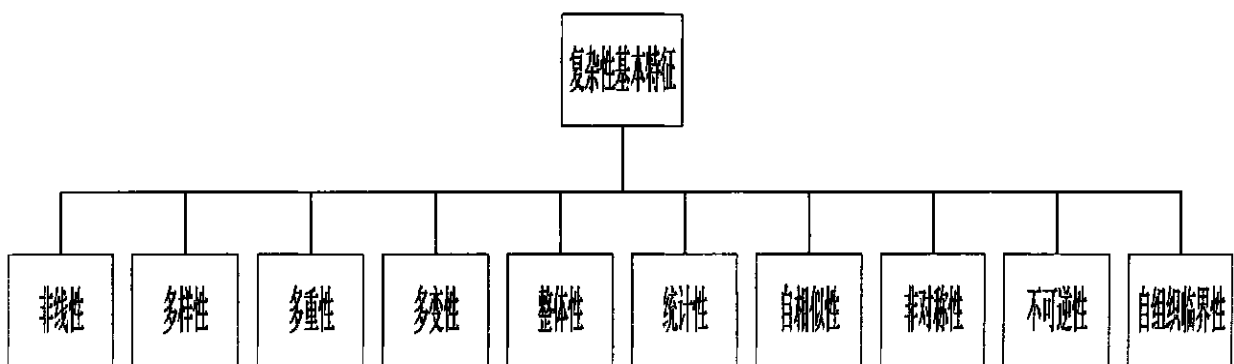
要根源. 这些挑战性课题所要探索的奥妙究竟与复杂性的奥妙有何关系? 李政道所说的“我们的宇宙充满了我们不了解的挑战性的现象 (不限于粒子物理)”, 显然这也应是复杂性研究的主要对象.

新世纪向科学技术提出的挑战是多方面的, 包括: 地球生态问题、人类的生存与发展问题、能源问题、探索人类自身及生物的奥秘问题, 包括脑科学和基因等生命科学、核科学与基本粒子问题、宇宙航行与空间探索、天体观察问题、天(大)气问题和其他高科技 (半导体芯片和生物芯片等) 等方面. 实际上, 科学技术的发展往往难以预测, 我们现在预计的许多挑战性问题在将来可能“突现”新现象、新问题、新特点, 这可能也正是复杂性问题需要研究的新情况. 因此, 在新世纪里我们处处面临着多方面的挑战和发展机遇.

### 三、复杂性的若干基本特征和可能的物理机制

迄今, 国内外对非线性/复杂系统的复杂性问题已有所研究. 许多物理系统、生物系统、经济系统和地球系统等, 甚至看上去很简单的非线性系统, 都有很复杂的动力学行为. 例如已发现广泛存在着各种分岔、混沌、时空图样、湍流等复杂性现象, 这些行为现在统统冠以“复杂性”. 复杂性研究已经成为各种交叉科学中的极富挑战性课题. 现有的知识为复杂性科学的研究提供了丰富的极有价值的资源和方法, 有利于进一步揭开整个“复杂性”的“庐山真面目”. 那么, 复杂性究竟有些什么基本特征呢?

据我们分析<sup>[3-5,7-18]</sup>, 复杂性具有以下“十大”特征或特性, 如附图所示. 现在我们对每一特性作些分析说明.



附图 复杂性具有“十大”特征

## 1. 非线性和非平衡

这是任何系统产生复杂性的主要根源所在。一个复杂系统通常都是由许多子系统组成,它们之间以某种或多种方式发生复杂的非线性相互作用,或开放系统在远离(非)平衡态下产生了复杂的耗散结构,即非线性和非平衡导致了不仅在时间上而且在空间上产生各种复杂形式的相干结构。例如,连续介质在高雷诺数的湍流运动中,由于强烈的非线性作用,表现出最为复杂的宏观运动。只要系统存在非线性和非平衡因素,甚至很简单的系统,例如一维逻辑映象,都能产生复杂的行为特性,就有四条熟悉的通向混沌的道路,即通过倍周期分岔走向混沌、准周期通向混沌、阵发混沌道路和“危机”道路,而且这些道路具有一定的普遍性。它们可以在一类非线性的离散系统、非线性常微分方程和偏微分方程中都存在相同的规律。至少这是一大类非线性系统产生复杂性的途径和机制。

## 2. 多样性

在自然界和人类社会中,大多数系统显示的行为既不是完全有序的和可以预测的,也不是完全随机的和绝对不可预测的。经常处于模糊的边界,或介于二者之间。因为有序态、随机态和混沌态等多样性行为可以共同存在于一个复杂系统中,它们能够依系统内外不同参数条件随时间和空间而变化,显示出多姿多态。

## 3. 多层性或多重性

复杂性王国通常包括分岔、混沌和有序,以及它们之间的错综复杂的相互转变。对于一个具有复杂的和内在特点的复杂性系统,同时可以存在有序的元素和随机的元素。在系统的参数空间内经常存在多重吸引子结构。事实上,复杂性王国存在不同的等级及层次结构。而且宏观层次和微观层次的复杂性也不一样。即使宏观层次,在人类社会中还包含自然、社会和精神三种不同层次的属性,而每个层次都有各自的复杂性。三种不同层次耦合在一起,更加错综复杂。像强流加速器驱动的洁净核能系统(ADS)、国民经济和社会可持续发展问题就属于这类巨复杂性问题的。

## 4. 多变性

混沌-复杂性的突出特性之一是,它对初始条件、参数和环境的微小扰动具有高度的敏感性,所谓“差之毫厘,失之千里”。系统的状态极其不稳定,变化多端,捉摸不定。例如,一个复杂系统形成各种时空图样,经常在时空范围内显示出链式结构和相干结构。有人称“一个具有

巨大变化性的系统称为复杂系统。”可见,多变性是复杂系统极为重要的基本特征之一。在复杂动力学系统中,大量的吸引集和排斥集经常相互作用导致丰富的可变的动力学。很多行为的竞争不仅是可能的,而且是不可避免的。通常,一个复杂系统的动力学趋向于在许多不同的行为当中“突现”出某种行为,或某种行为在竞争中取胜,占主导地位,或由合作效应产生出复杂的整体图象(图样)。这当中吸引集和排斥集的性质所起的关键作用是使各种不同状态之间发生转变。例如,已经发现其中一种机制是,在动力学系中当系统参数变化通过某个(些)临界值时,出现所谓“危机”,这种突变时可能使混沌吸引子被毁灭,或者产生新吸引子,或者产生不动点,或者原吸引子被扩大,或者原吸引子被塌缩,或者出现多种吸引子,甚至还可以出现时空混沌,等等。总之,系统在某些临界参数处由于“危机”出现了复杂状态,这也是通向混沌-复杂性的另一条道路和机制。

## 5. 整体性

对于一个复杂的非线性系统,系统的整体行为并非简单地与子系统的行为相联系,必须从整体上去把握系统的发展趋势和特点,不能简单地从局部的个别行为的细节去判断。系统的整体行为决不是所有局部行为的简单相加,一般情况是 $1+1 > 2$ 。因为复杂系统中子系统的行为之间充满着竞争,竞争的结果如何则取决于很多因素。它们的行为往往是共同竞争或合作的结果,或是协同效应,或是优胜劣败的结果。因此,对复杂性系统进行整体性的研究至关重要。

## 6. 统计性

既然复杂系统是由大量子系统组成的,所以它的基本动力学行为都应是大量子系统统计的平均行为。表征“复杂性”的各种物理量应该具有统计性。这样,研究复杂性就要应用统计理论来描述和处理。像混沌-复杂性就是系统长时间的统计的平均行为,具有明显的统计特性,例如熵和拓扑维就是统计量。

## 7. 自相似性

非线性/复杂系统中存在层次不同的自相似性。它们既可以是几何图形相似,又可以由“功能”或“信息”架起的数学物理模型。例如 Lorenz 方程与 Haken 单模激光方程就是完全相似的,因此具有相似的混沌行为与复杂性。分形具有典型的自相似性,它们可以同时具有形态、功能和信息三方面的自相似性,也可是其中之一。分形可以是严格的自相似性,也可以是统计意义上的自相似性。

自相似性具有不同层次结构的差异,并且自相似性还广泛存在于自然界、自然科学、社会经济、人文艺术等领域中。

### 8. 非对称性——对称性破缺

在具有一定类型对称性的一些复杂的物理系统中,不仅经常产生自相似性,而且发生对称破缺现象。这个共同特征对于理解复杂性的多样性,包括图样形成,连续相变,乃至宇宙起源等,都起着越来越重要的作用。令人感兴趣的是:由于非线性作用,自相似性和对称破缺及恢复能够出现在许多动力学系统的分叉结构中。例如,出现在倍周期分叉通向混沌的分叉图结构里。

### 9. 不可逆性

经典科学中的物理基本定律对于时间都是对称的。例如,牛顿运动方程和薛定谔方程,对于时间反演,即以  $-t$  替换  $t$ , 替换后,两个方程的解都是不变的,说明过程具有可逆性和对称性。但是,在非线性系统和复杂系统中则发现:时间反演的不可逆性和不对称性,产生了对称破缺。例如:气体的扩散、化学反应、电流的流动、热的传导等。事实上,自然界万物发展都具有方向性和不可逆性,宇宙学、生物学、地质学和化学等一概如此。

### 10. 自组织与临界性

自组织是开放系统在大量子系统合作下出现的宏观上的新结构。例如:贝纳德对流、耗散结构、相干结构等。通常有一个自组织“核心”,如晶体中的晶核。在物理上,自组织临界现象存在标度律是这类复杂系统的突出特征。如同我们用手不断加沙子堆起的沙堆那样,当多余的沙子加上后,沙堆就会发生雪崩,这就是一种不稳定的临界现象。产生地震的地壳经板块运动产生的压力,也会在空间和时间上出现一种临界现象,于是便爆发地震。例如我国大陆地区 1970~1998 年 2 级以上地震震级 - 震级关系存在  $\log N = 6.99 - 0.75 m$ , 这里  $m$  为震级,  $N$  为震级在  $(m - m/2, m + m/2)$  范围内的地震个数,该曲线的斜率为 0.75,具有标度不变性。

实际上,复杂性的基本特征还有其他方面。例如,自适应性等。不过上述特征的大多数已经在具有很多自由度的复杂系统中被发现和被越来越多的系统所证实。很多有趣的特性将为人们提供影响、运作、控制或管理复杂性系统的良机 and 途径。也就是说,可以应用上述发现的和将要揭示的复杂性特性,提出相应的对策,人为地驾驭复杂性,以便为我所用。

## 四、混沌系统和湍流系统具有典型的复杂性

值得指出的是,混沌系统和湍流系统具有典型的复杂性,带有普遍性。例如,充分发展的湍流小尺度脉动的统计规律反映了小尺度湍流场在尺度变化下的某种自相似性或不变性,又表现出标度性质<sup>[19]</sup>。最成功的预测湍流中存在标度律的是 Kolmogorov 提出的湍流理论,著名的 Kolmogorov 4/5 定律、湍流速度的 2/3 定律、湍流能谱的 - 5/3 定律都已被实验所证明,但是还存在反常标度律,需要具体情况具体分析。

混沌不仅出现于代数方程和一维及高维映象方程,而且出现在自治和非自治常微分方程、偏微分(积分)方程以及泛函方程中。为了描述倍周期分岔中复杂的标度性质,美国科学家费根班姆(Feigenbanm)引入标度函数,得到了重要的标度律。

考虑一般非线性函数迭代,即离散映象  $X_n = f(X_{n-1})$  是  $[0, 1]$  到  $[0, 1]$  的一个迭代,当乘上一个参数  $\mu > 0$ , 变成迭代  $X_n = \mu f(X_{n-1})$ , 看看参数  $\mu$  对迭代有什么影响,随着  $\mu$  的增大,先是只有周期 1 的定常解;当  $\mu$  增大到  $\mu_1$  时定常解分岔为两个周期 2 的定常解;当  $\mu$  进一步增大到  $\mu_2$  时,周期 2 的定常解分岔为四个周期 4 的定常解,……当  $\mu$  增大到  $\mu_n$  时,周期  $2^{n-1}$  的定常解分岔为  $2^n$  个周期  $2^n$  的定常解,……如此下去,在  $\mu$  处最终出现混沌。非线性迭代无穷进行下去,可以得到普适的费根班姆泛函方程,即描述倍周期分岔特性的重整化群方程:

$$\lim_n f^{(N)}(x) = g(x) = -xg(g(\frac{x}{a})),$$

这里  $N$  为迭代次数。倘若把系统每次分叉点所对应的参数值分别记为  $\mu_n, \mu_{n+1}$  等,则每两次分岔间隔比,即称分岔序列的收敛率:

$$= \lim_n \frac{\mu_{n+1} - \mu_n}{\mu_{n+2} - \mu_{n+1}} = 4.669\ 201\ \dots$$

称为 Feigenbanm 常数,它表明发生两次倍周期分岔区域越来越窄。是一个普适常数,与具体方程(不论是连续的还是离散的迭代)形式无关。它是由 Feigenbanm 首先从函数迭代数值研究得出的。然后又应用上述重整化群方程严格证明了普适常数的正确性。对截然不同的函数进行迭代,在迭代过程转向混沌时,它们竟遵循着同样的规律,都受到同一个常数的支配,甚至对凡存在倍周期分岔通向混沌的所有的微分方程(系统)等也概不例外,都有相同的常数。这个结果与许多实验测量结果

相一致,并充分说明不同非线性系统一方面可以出现相同的分岔结构和定量特性,另一方面对于同一系统它们的特性适用于不同层次的内部几何嵌套的自相似结构。

我们知道在物理学中任一次发现普适常数,如重力常数  $g$ ,光速  $c$  及普朗克常数  $h$  等等都具有极端重要的物理意义。无疑,常数的发现也将具有深远的意义。

标度律也称标度不变性。倍周期分岔通向混沌中分岔前后的几何图像具有自相似结构,它们之间存在一个放大倍数“ $\mu$ ”的标度变化因子,即每变动一次测量的“尺寸”,都得到相同的数据,此现象称为

$$f^{n+1}(r_{n+1}, x) = \frac{1}{\mu} f^n(r_n, x)$$

标度不变性。Feigenbaum 发现了一维单峰映象的普适标度变换因子,定义为:当  $n \rightarrow \infty$  时,上述  $\mu$  为标度因子,其中  $r_n$  和  $r_{n+1}$  相应于倍周期分岔前后的参数,  $f^n$  与  $f^{n+1}$  分别对应于第  $n$  次和第  $n+1$  次迭代:

$$f^n = f(\mu, f(\mu, \dots f(\mu, x)))$$

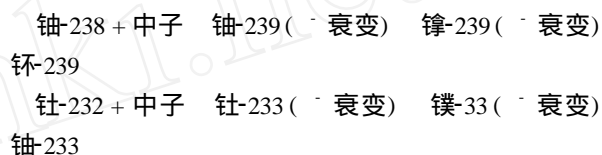
由 Feigenbaum 计算出  $\mu = 2.502907875$ 。因子的普适性表现为它并不依赖于  $f(\mu, x)$  的具体形式,而只与“单峰”有关。但是,注意到对于多峰情形则有多个不同的标度因子。

由于标度律是一大类复杂现象表现出的一种共同规律。混沌、湍流、相变和自组织临界性等都存在标度律。正是这一点,混沌、湍流、地震等具有复杂系统的典型特性,并揭示了复杂性背后的简单规律。简单非线性系统产生复杂性,而一些复杂系统却显示出某种简单规律,这也许就是事物的辩证法。但是却不是复杂性的全部奥秘。需要我们进一步探讨全部奥秘所在。

## 五、强流加速器驱动的洁净核能系统的复杂性

在原子能科学技术领域历来广泛存在十分复杂的各种问题。例如热核聚变及其高温等离子体是当今最复杂物理和工程问题,上述各种复杂性(包括分岔、混沌和湍流)无所不在。已经经过几代科学家和工程师等的努力,取得了重大进展。原理性问题已经证明,但是迄今还没有达到商业发电的程度。根据估计,可能要推迟到新世纪的后半叶。因此,从裂变能的商业应用到聚变能的商业应用是一个相当长的时期,估计裂变能的商业应用还有近百年的“独占”地位。目前核裂变能仍然是核电的主要发展方向。但是核裂变能还存在一些缺点:高放废物的处理难、铀资源利用率低(0.75%)及可能导致超临界事故所产生的放射性泄漏安全等问题。为了克服上述缺点,诺贝

尔得主 Rubbia 于 1993 年提出了强流加速器驱动次临界反应的洁净核能系统(ADS)。ADS 成为当前国际上的研究热点,也是新世纪我国核能持续发展的最新技术选择之一。它的最大特点(创造性)是把上世纪两个最大的核装置巧妙地结合起来,开辟核能发展新道路。其基本工作原理是:利用核反应嬗变废物中的高放射性核素,以达到低放射性与洁净核能输出。关键技术是利用加速器驱动的嬗变。如果  $I = 20$  mA,可产生 30 中子/质子,则由加速器产生的中能质子轰击靶每秒得到  $3.6 \times 10^{18}$  中子。假设次临界装置的效率  $K_{\text{eff}} = 0.98$ (该堆特点是  $K_{\text{eff}} < 1$ ),这部分外中子将被放大  $1/(1 - K_{\text{eff}})$  倍,即放大 30 倍,在次临界装置内形成约  $10^{15}$  中子/cm<sup>2</sup>s 的稳定中子通量。若以铀-238 或钍-232 作为燃料,在次临界装置中会发生下列过程:



即将热中子几乎不能引起裂变的铀-238 或钍-232 分别转变为裂变截面较大的钚-239 或铀-233,然后通过钚-239 或铀-233 的不断再生裂变,源源不断地输出附加的能量。驱动堆具有能量放大的功能,对于以钍为燃料的快中子堆,能量放大倍数可达 150。这意味着:一个功率 10 MW 的加速器可以驱动功率为 1500 MW 的驱动堆式核电站。因此 ADS 核电站比常规核电站有明显的优点,已成为国际上的研究热点。

AND 的巨复杂性表现在科学、技术、工程三大方面。其中两个关键核装置,即加速器和反应堆都存在混沌运动。特别是强流质子直线加速器的实验和理论研究都发现:在强流质子流下产生了复杂的束晕-混沌现象,由于随着质子行进的加速器轴向聚焦周期数目的增加,强流加速器中的束晕-混沌现象变得越来越严重,束流最终打到加速器的管壁上,引起严重的放射性剂量超标,这是强流粒子束应用中,特别是在加速器驱动的洁净核能系统中所不允许的。为了避免对加速器环境和人身造成严重的危害及满足许多应用要求,必须设法抑制和控制束晕-混沌现象。国外实验采用束流限制板来挡掉外圈的粒子。许多限束的措施并不奏效,随着束的继续行进,束晕又再生出来。美国的实验工作指出:束晕“刮”不掉,无法克服束晕再生现象。“刮”后会再生,究竟产生复杂的束晕-混沌的物理机制是什么?根据我们分析,既有宏观物理机制,又有微观物理机制。宏观物理机制是多样的,主要有非线性空间电荷效应、粒子横向能量交换、粒子与核心相互作用和粒子共振覆盖等导致束晕-混沌。

而微观物理机制可能是量子混沌。

那么,到底如何控制束晕-混沌?这是国际上令人关注的课题。最近10年国际上迅速发展的混沌控制方法,为这个难题的解决提供了一种新的研究方向。目前混沌控制方法可以分为线性方法和非线性方法。因为束晕-混沌是特殊的时空混沌现象,应用一般的线性控制方法还达不到控制效果。ADS要求直线加速器中的质子流强度高达几毫安至250 mA,比通常加速器的束流高出两三个数量级。尽管已经提出了许多控制方法,但是都无法控制束晕-混沌的复杂性。为此,我们近年提出了非线性反馈控制方法,特别是设计了一种特殊的非线性函数——小波反馈函数,应用离散控制方法,有效地实现了对强流质子束的束晕-混沌的理想控制,从而能够很好地满足加速器驱动的放射性洁净核能系统及其他实际应用中,对晕度最低束损等要求,并且很好地改善质子束的性能(均匀性等)。采用两种控制方式,即单周期和多周期离散控制,都分别实现了对束晕-混沌的令人满意的控制。

## 六、多介质激光耦合系统的复杂性

考虑多个介质激光之间的相互耦合,即使注入每个介质的泵浦功能和介质之间的耦合系数完全一致,系统的行为会发生很大的变化。其次,从应用上,单介质激光系统可应用于全光学触发器、超快速开关、双稳仪等,而多介质激光耦合系统在这方面有更加优越的功能;特别是双向耦合的动力学行为更有意义(如应用于双向耦合多介质系统的记忆功能)。我们研究了多个激光耦合阵列系统在大耗散情形的动力学复杂性。

### 1. 多介质激光系统的 Hopf 分岔

在单介质系统中,我们应用一套求解系统 Hopf 分岔的简单有效方法,它可导出介质响应与延迟时间的比值,使在映像方程中独立的上下支双稳定状态得以用联系起来;还能通过改变在多稳区中得到不同的稳定不动点解。在多介质系统中,多稳现象更为丰富, Hopf 分岔更有意义。在满足大耗散近似的单向耦合下,随着  $A$  的增大,系统的多稳现象越来越丰富。同时,多稳现象随着介质数  $N$  的增大也越来越丰富,因而满足 Hopf 分岔要求的点也越来越多。当  $A$  增大时,有一最大的几乎不与其他重复的值。这表明,如果取很大的,即相当于非线性介质很薄,因而穿过介质的延迟时间很短,则会得到高强度的稳定的功率输出,此亦分岔的控制问题。反之,延迟时间越长,越小,系统越容易进入混沌。

进一步分析表明,对于某个能得到在某个参数空

间上的一系列分岔点。这样,一般情况下,就能确定在多大的参数空间内,得到一个完整的分岔图。例如动力学方程可近似由稳态方程代替,得到一系列 Hopf 分岔点:  $A = 1.4, 1.83, 2.24$  等,由此判断,在这些相邻两者之间,存在一个完整的分岔图,这个结论是正确的。随着  $A$  的增大,存在完整分岔图的参数空间,当  $A$  大于某个阈值时系统将不存在 Hopf 分岔,因而系统将是在全参数空间内稳定的。

当  $A = 0$  时,即大延时极限下,在单介质系统中,此时不存在 Hopf 分岔,但在多介质系统中依然存在 Hopf 分岔,这时多介质系统中方程的微分项极为重要。系统的多稳性与介质的数目也有很大的联系。随着  $N$  的增大,多稳区更为丰富,尤其在双向耦合时系统进行着非马尔可夫过程,系统的双稳区域将随着  $N$  的增大而增大。

我们对系统的不稳定行为进行分类:对于单介质系统,当  $A = 0$  时,总是趋于,这表明单介质系统映像方程不可能存在 Hopf 分岔。对于多介质系统,当  $A = 0$  时,有些趋于 0 或,这类 Hopf 分岔我们可称之为平凡 Hopf 分岔;而有些不趋于 0 或,这类情况下的 Hopf 分岔可称之为非常 Hopf 分岔。单介质系统中不存在非常 Hopf 分岔。同时看到, Hopf 分岔还允许发生在  $A > 0$  下,即使忽略  $t_R$  系统也存在不稳定区域,这是单介质系统所没有的。

### 2. 多介质激光耦合系统的时空混沌及其控制

对多介质耦合激光系统的时空混沌研究表明,简单的系统能产生复杂的动力学行为,从而可以利用其复杂的功能。例如,利用混沌产生的多样性图形进行复杂信息的产生和存储。为此,需要对时空混沌进行控制。因为空间分布被稳定后,不随时间改变,空间分布才能被用来储存、识别信息,实现了系统的记忆功能。研究表明:在很大的参数范围内,双耦合激光系统在一定的耦合强度下可以达到稳定空间混沌。由于系统远离平衡态,这些空间混沌花样一经产生,便是相当稳定的。当然,当外加能量很大时,系统将进入时空混沌状态。然而,在单向耦合下,稳定的时空混沌解范围极小,且随着介质数目  $N$  的增大而指数减小。因此,单向耦合系数实际上无记忆功能,只要双向耦合系统有  $(1/7)$  bit/cell 的储存容量,有一定记忆功能。可以证明那些稳定的空间混沌解是轨道异宿的,因此系统在两个特定的状态间不停地进行着转换。异宿轨道分成两类:a型是稳定的,b型是不稳定的。一个记忆单元至少需一个有七种状态组成的稳定异宿轨道结构,因此能导出每一介质能储存的信息为  $(1/7) \log H / \log 2$  字节,  $H$  为系统的拓扑熵。

同时,已经应用脉冲微扰动控制法对激光中的空间混沌实现了稳定控制.当系统处于2P异宿轨道时,采用对线性相移或外加能量修正控制,同时给系统一扰动触发脉冲,使系统产生所要求的空间花样.空间花样一旦产生,即是时间稳定的,信息便永久地被保存起来.这样,混沌花样之间可以转换、重写.只要再注入一定的脉冲,花样即可改变,具有应用前景.

### 3. 多耦合激光系统的自组织和同步特性<sup>[5]</sup>

对于依靠波导之间小场强实现相互耦合的多个激光系统,在最邻近耦合下,电场幅度( $E_j$ )及粒子数( $N_j$ )的演化方程满足

$$\begin{aligned} \dot{E}_j &= \frac{1}{2} [G(N_j) - \frac{1}{p}(1-i)E_j + E_j(E_j + E_{j-1})] \\ \dot{N}_j &= P - \frac{N_j}{s} - G(N_j) |E_j|^2 \end{aligned}$$

值得注意的是,倘若 $N_j$ 是绝热消去的,则上述方程不仅与耦合的范德玻(Van der Pol)方程组相似,并且与离散的Ginzburg-Landau方程也相同.后者常用来描述典型的复杂时空系统.因此,研究上述方程具有代表性及普适意义.上述 $G$ 为增益, $p$ (~1ps)是光子寿命, $s$ (~2ns)是激活粒子的寿命, $P$ 是泵浦率, $K$ 为相邻激光的耦合强度.参数 $K$ 称为半导体激光器中的线宽增强因子.

从研究激光系统中电场( $X_j$ )及相位( $\theta_j$ )及在第 $j$ 激光中载体密度 $Z_j$ 无量纲方程可知:对于一个无耦合的振荡器集合,它会演化到一个稳恒态 $Z_j=0$ , $X_j=p^{1/2}$ 及任意相位 $\theta_j$ 上去.对于耦合情形,激光阵列可以自身组织成一种宏观上的相干态.该态在振荡器之间存在确定的相位关系.耦合(激光)振荡器最重要的集体行为特性就是自组织、同步行为或相互迁移行为.

耦合激光阵列存在两个层次的同步:静态同步和动态同步.第一层次是一种静态同步,激光幅度 $X_j$ 及载波密度 $Z_j$ 不随时间改变,而相位对于所有的激光在相同速率下随时间按线性变化.对于弱耦合情形( $K=10^{-5}$ ),存在稳定的相位锁定或静态.其中跨越阵列的幅度分布几乎是均匀的,倘若不是这种情形,则强场的局部区域(通过 $K$ 参数)会导致激光之间失谐,因而导致相位锁定失稳.然而,这种均匀的相位锁定态不总是稳定的,当超过一个临界耦合强度时,静态通过一个超临界的Hopf分岔失去稳定性.从物理上说,载波的延迟响应导致相位滞后及破坏了相位锁定,于是动力学变量的幅度、相位及载波密度等,所有的量都在随时间脉动.第二层次是一种动态同步:它发生在激光阵列的不同元素之间的脉冲可能随时

间彼此步调一致,区别于第一层次同步的静态特征.对于三个相同激光器耦合系统的混沌同步情形:用一个空间栅赋予一个空间对称性,使之预知激光阵列中元素的行为同步.在稳定相位锁定态中,对称性表明 $X_1=X_3$ .对此特殊情形,当耦合系数 $K < 10^{-4.43}$ 时,存在稳定静态,当耦合系数 $K$ 超过该临界值时,相位锁定的分支解失去稳定性,而有利于一个自脉冲解的产生,空间对称性 $X_1$ 与 $X_3$ 的脉冲被维持同步.在 $K=10^{-3.578}$ 、 $10^{-3.541}$ 及 $10^{-3.534}$ 等处发生了倍周期分岔的序列,在这个分岔的整个过程中,激光1和激光3仍然保持彼此同步,即 $X_1=X_3$ , $Z_1=Z_3$ .但是,在耦合系数 $K=10^{-3.5}$ 的情形,激光阵列中每个激光输出的时间演化是混沌的.因为李雅普诺夫指数谱为(+6.1,0,0,-2.1,-2.3,-.4,-3.8,-4.0,-13.0) $\times 10^{-4}$ 中有一个正值证明了混沌运动.

值得注意的是,虽然激光1和3的输出强度的时间演化达到了同步,即 $X_1=X_3$ ,但是在 $X_1-X_2$ 平面内则为一个混沌奇怪吸引子,即 $X_1$ 与 $X_2$ 并不同步.因此,这时激光同步的秩序相应于空间有序但时间混沌.

总之,在一个时空分布的复杂系统,如上述的激光耦合阵列中,可以自发地产生同步混沌的时间序列.该同步是它们的子系统相互影响共同作用的结果,只有在一定的耦合强度的区域内才可能达到时间混沌同步.当出现时空混沌或超混沌时,同步可能被破坏.因此,要实现时空混沌同步或超混沌同步,还必须采用更有效的同步方法或施以新的措施.研究表明:空间对称性的存在并没有保证混沌轨道的同步,当耦合强度 $K$ 减少到 $10^{-3.0}$ 时,同步被破坏了,在 $X_1$ 与 $X_3$ 之间根本没有明显的演化关系,连时间有序也更换了.这种空间对称性破缺从 $X_1-X_3$ 及 $X_1-X_2$ 相图的混乱性便一目了然.这时吸引子是一种高度缠结复杂形态. $X_1-X_2$ 的相图比同步混沌情形复杂得多,此时时空混沌的秩序,与此演化有关的李雅普诺夫指数为(+30.9,+12.8,+0.4,0,-0.8,-3.4,-5.7,-17.2,-33.6) $\times 10^{-4}$ .该系统有三个正的李雅普诺夫指数.这表明系统这时处于超混沌运动.因此,还没有达到超混沌同步.

为此,已经发展了一些控制和同步激光系统混沌的先进的方法,如:延迟反馈控制法、变量耦合法、空间小扰动法、偶然正比反馈技术和外部噪声控制法等能有效地实现对混沌-复杂性的控制或同步,它们也可以应用于其他混沌-复杂性的控制和管理.

## 七、复杂系统的分类方法初议

复杂系统究竟如何分类是一个值得探讨的课题,因

为分类有利于深入研究和揭示复杂系统的共同特性. 目前讨论分类工作还很少. 这里仅仅提出自己的初步设想, 希望能起到抛砖引玉的作用.

### 1. 按学科分类

例如, 按照物理、生物和社会经济等不同学科分门别类, 然后进行交叉、融合、抽象、综合和提高, 总结出复杂性的共同规律和特性. 其中许多已经成为独立学科.

### 2. 按复杂度分类

按照系统复杂度划分为小、中、大、巨复杂系统. 不过, 复杂度的标准尚有待进一步研究.

### 3. 按某种规律或特性分类

已经有按照标度律和自相似性等规律分类的. 例如, 在湍流理论中多重层次结构标度律的存在, 说明一大类非线性耗散系统普遍存在标度律. 显示了复杂性背后的简单性. 由于标度指数是复杂系统的统计对称性质的反映, 因此可以应用标度指数对复杂系统进行统计分类. 如, 按照多重层次结构标度律, 利用复杂系统中  $(C_i, b_i)$  的数目  $n$  进行统计分类.

### 4. 按复杂性不同理论和测度方法分类

迄今国际上已经提出各种复杂性理论、算法和测度方法, 从不同侧面反映了某种分类方法, 有利于复杂性问题的深入研究, 但是还远没有达到公认的或统一的理论. 目前这方面的理论方法主要有: 信息理论或算法信息理论; 哥洛莫歌罗夫复杂性和哥洛莫歌罗夫 - 链随机性; 算法复杂性; 随机复杂性; 描述复杂性及最小描述长度; 程序长度复杂性; 逻辑长度和复杂性; 多标度理论; 拓扑指数和预测测度; 符号动力学; 遍历理论; 计算理论和新三论(耗散结构理论、协同理论和突变理论等), 都提供了从不同领域研究复杂性理论的方法和基本工具.

## 八、复杂性科学或复杂性研究展望

非线性与复杂性科学的研究如火如荼, 不论对自然科学, 还是对社会经济科学和人文科学, 都是极富有挑战性的、极为活跃的崭新科学. 它可能成为 21 世纪科学发展的主流之一. 目前, 国内外对复杂性科学和复杂性的认识不断提高, 但是不尽相同, 这是学科发展处在初期的必然现象, 也正是开展“百家争鸣, 百花齐放”的大好春光.

需要不同领域的科学家共同讨论, 从各自的领域出发, 探讨复杂性, 相互启发和补充, 然后进行综合和提升, 寻找复杂性的共同特征, 不断地在具体应用中得到验证和完善, 这样才能达到有所创新和发展. 我个人认为, 目前大致有以下有意义的课题:

(1) 研究复杂性科学理论与复杂性的共同特征、转变方式及其各种机制.

(2) 研究复杂性表现形式与内在规律及其联系: 分岔、混沌、湍流、时空图样与相干结构及其演化规律, 各种不可预测的现象的“涌现”和转化机制.

(3) 需要发展和突破复杂性科学的研究方法、手段和实验装置.

(4) 研究驾驭复杂性方法和技术, 例如混沌控制、反控制和混沌同步理论与方法.

(5) 研究开发复杂性在众多领域中的应用: 复杂性工程及其在各个领域的应用. 例如, 在物理、生物、医学工程、社会经济与金融、信息技术(保密通信)、能源(核能)、化工石油、地球物理、凝聚态物质、材料、计算机、宇航等高科技领域的应用.

总之, 复杂性科学将为众多领域的研究和发展提供新思路、新途径、新方法和新应用, 只要进一步深入研究, 大有发展前景.

(2001 年 9 月 25 收到)

- Nicholls J., Collins R. *Millennium Science*, The University of Sydney, 1999
- 李政道. 物理的挑战. 北京: 大型学术报告会, 2001 年 10 月 7 日
- 尼科里斯, 普里高津著. 探索复杂性. 成都: 四川教育出版社, 1986
- 成思危主编. 复杂性科学探索. 北京: 民主与建设出版社, 2000
- 方锦清. 复杂性现象的研究. 自然杂志, 1985; 7(4): 254
- 方锦清. 驾驭混沌与发展高新技术. 北京: 原子能出版社, 2001
- C. 格里博格 J. A. 约克编. 混沌对科学和社会的冲击. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2001
- 方锦清. 非线性系统中的混沌控制、同步及其应用前景(一), (二). 物理学进展, 1996; 16(1): 1-74; 16(2): 137-202
- Fang J. Q. The effects of white noise on complexity in a two-dimensional driven damped dynamical system. *Phys. Lett. A.*, 1989; 142(6, 7): 347: 344
- Fang J. Q. Colored noise induced nonequilibrium transition in a new chemical oscillator. *Commun. Theor. Phys.*, 1992; 17(1): 39-48
- Fang J. Q., Generalized farey organization and generalized winding number in a 2-D DDDS. *Phys. Lett. A.*, 1990; 146(1, 2): 35-44
- Fang J. Q., Chen G. Some general features of complexity and its control and anti-control strategies. *Proceedings on Sino-German Symposium on Complexity Science*, Beijing, China 2000: 163-172
- Fang J. Q., Chen G. Complexity and control strategies for accelerator driven clean nuclear power systems. *The Proceedings of the Second Workshop and Conference of Econophysics and Financial Complexity*, Guilin, China 2001: 21-26
- Fang J. Q., Chen G. Complexity and its control and anti-control strategies. *The Proceedings of the Workshop and Conference of Econophysics and Financial Complexity*, Hefei, China 2000: 21-29



- 15 Fang Jin-Qing, Hong Yiguang, *et al.* Nonlinear control of chaos systems: A switching manifold approach. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2000;4:257-267
- 16 方锦清. 强流加速器驱动的洁净核能系统中的一个关键问题. 自然杂志, 2000;22(2):63-69
- 17 方锦清. 非线性反馈控制强流加速器中的束晕-混沌现象. 强激光与粒子束, 2001;12(5):647-651
- 18 Rubbia C. A high gain energy amplifier operated with fast neutron. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 346, *the Third International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications*, Las Vegas, 1994. (Also, see CERN/AT/93-47(ET), 1993)

19 王晋军等编. 湍流研究的最新进展. 北京: 科学出版社, 2001

## Complexity Science and Study of Complexity

Fang Jin-qing

Professor, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413

**Key words** complexity science, general features of complexity, total origin of complexity, chaotic systems, turbulent systems, accelerator driven clean nuclear power system, coupled laser systems

# 分子基磁性材料的研究与展望\*

戴耀东 余智

博士生, 南京大学物理系, 南京 210093

副教授, 南京大学配位化学研究所, 南京 210093

\* 国家自然科学基金项目(G20001004)和国家重点基础研究项目(2000077500)资助

**关键词** 分子磁性 磁交换 双稳态 分子基磁性材料 分子设计

根据当前国际前沿的研究动态, 结合作者在该领域的多年工作, 对新一代的功能材料——分子基磁性材料的发展历史、研究基础和可能有突破的研究热点体系作了通俗的介绍, 并简述了其潜在的应用前景.

## 一、引言

作为一种新型的软材料, 分子基材料(molecule-based materials)在近年来材料科学的研究中已成为化学家、物理学家以及生物学家非常重视的新兴科学领域<sup>[1]</sup>. 分子基材料的定义是, 通过分子或带电分子组合出主要具有分子框架结构的有用物质. 顾名思义, 分子基磁性材料(molecule-based magnetic materials), 通称分子磁性材料, 是具有磁学物理特征的分子基材料. 当然, 分子磁性材料是涉及化学、物理、材料和生命科学等诸多学科的新兴交叉研究领域. 主要研究具有磁性、磁性与光学或电导等物理性能相结合分子体系的设计、合成. 我们认为, 分子磁性材料是在结构上以超分子化学为主要特点的、在微观上以分子磁交换为主要性质的、具有宏观磁学特征并可能应用的一类物质.

分子铁磁体是具有铁磁性质的分子化合物, 它在临界温度( $T_c$ )下具有自发磁化等特点. 分子磁体有别于传统的不易溶解的金属、金属合金或金属氧化物磁体. 传

统磁体以单原子或离子为构件, 三维磁有序化主要来自通过化学键传递的磁相互作用, 其制备采用冶金学或其他物理方法; 而分子磁体以分子或离子为构件, 在临界温度以下的三维磁有序化主要来源于分子间的相互作用, 其制备采用常规的有机或无机化学合成方法. 由于在分子磁体中没有伸展的离子键、共价键和金属键, 因而很容易溶于常规的有机溶剂, 从而很容易得到配合物的单晶, 有利于进行磁性与晶体结构的相关性研究, 有利于对磁性机制的理论研究. 作为磁性材料, 分子铁磁体具有体积小、相对密度轻、结构多样化、易于复合加工成型等优点, 有可能作为制作航天器、微波吸收隐身、电磁屏蔽和信息存储的材料.

分子磁性研究始于理论探索. 早在1963年 McConnell<sup>[2]</sup>就提出有机化合物可能存在铁磁性, 并提出了分子间铁磁耦合的机制. 1967年, 他又提出了涉及从激发态到基态电子转移的分子离子之间产生稳定铁磁耦合的方法<sup>[3]</sup>. 同年, Wickman<sup>[4]</sup>在贝尔实验室合成了第一个分子铁磁体. 之后, 科学家们相继报道了一些类铁磁性质的磁性化合物, 但直到1986年前, 这些合成的磁性化