

# 物理学研究的新领域——探索复杂性

姚虹<sup>1</sup> 张建玮<sup>2,†</sup> 狄增如<sup>3,††</sup>

(1 内蒙古农业大学理学院 呼和浩特 010018)

(2 北京大学物理学院 北京 100871)

(3 北京师范大学管理学院 北京 100875)

**摘要** 文章介绍了近代科学思想和方法论中的两个基本模式,即还原论和系统论,指出在物理学及其交叉学科中探索复杂系统将是未来科学发展的一个重要领域,它们共同构成复杂性科学.文章说明了复杂网络的一些特殊性质,它们可以用来描述一些复杂系统的结构和功能.作为一个导引,文章还介绍了国内外研究复杂系统的主要学术流派,并重申复杂性研究以及交叉学科对中国中长期科学发展的重要意义.

**关键词** 还原论, 系统论, 复杂性, 复杂网络, 交叉学科

## Exploring complexity —— a new realm in physics

YAO Hong<sup>1</sup> ZHANG Jian-Wei<sup>2,†</sup> DI Zeng-Ru<sup>3,††</sup>

(1 College of Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

(2 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(3 Department of Systems Science, School of Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract** Based on discussions of the two fundamental ways of thinking in modern science, namely reductionism and systemism, we point out that complexity science, in which physics and its related interdisciplinary studies are deeply involved, is a vital territory in the development of contemporary science. Investigations on the particular characteristics of complex networks can be useful in the description of the structure and functions of various complex systems. As an introduction, we list the major schools in the field of complex science worldwide. Research on complexity and cross-disciplines is of deep significance in China's long-term scientific development.

**Keywords** reductionism, systemism, complexity, complex networks, interdisciplinary science

### 1 引言——从还原论到系统论

自从伽利略开创近代科学的科学思想和科学方法以来,科学技术取得了飞速的发展,尤其是在已经结束的20世纪的100年中,人类对于自然和生命的奥秘获得了丰富而深刻的认识.

这些科学成就的取得在很大程度上有赖于还原论的科学研究方法.还原论是近代科学研究的基本方法论.当我们希望了解研究对象的性质和规律时,通常采用分析的方法,先将认识对象拆分还原成更基础的部分,了解每部分的结构属性,再试图由部分

出发综合推演出整体的属性.这种化复杂为简单的方法,适应和推动了20世纪科学研究的发展,许多对世界产生重大影响的发现都源自于这种基本的方法论.例如,对于物质结构的认识就经历了这样一个典型的认知过程,从分子到原子再到更细微的基本粒子.现在我们已经认识到,在我们所生存的浩瀚宇宙,无论是太空中的日月星辰还是地球上的花草树木,都是由同样的种类为数不多的夸克和轻子所构成.对生命奥秘的理解也经历了一个类似的过程,从

2010-01-11 收到

† 通讯联系人. Email: james@pku.edu.cn

†† 通讯联系人. Email: zdi@bnu.edu.cn

个体、组织器官、细胞到 DNA, 我们已经了解生命的奥秘应该刻画在我们尚未完全解读的基因序列之中. 事实上, 除了以上物理学和生物学所代表的自然科学领域外, 还原论的科学研究方法论已经影响了并正在影响着其他许多领域的科学研究工作, 包括社会经济等领域. 古典经济理论的理性经济人假设就认为: (1) 人类行为都是理性的; (2) 个体行为可以从整个经济系统中孤立出来; (3) 人类行为具有一般的模式, 它可以对个体行为的分析中抽象出来; (4) 每个个体的行为可以与经典物理学的运动相类比, 它是有规律的、可预测的, 个体在一定环境中的行为是确定论性的; (5) 整个系统的行为是每个个体行为的总和. 这一研究经济系统的线路就是典型的还原论的处理方法, 微观经济的一般均衡理论就是在此基础上建立的.

还原论的成功使人类获得了科学技术的巨大进步, 同时也使其部分奉行者产生了对这一基本方法论的过高估计. 他们相信物质可以细分, 物质的高级运动形式规律也可以由更低级、更基本的运动规律来代替或解释, 认识世界最好的途径就是恢复研究对象最原始的状态. 但随着科学技术的进步, 还原论的局限性也逐渐凸现出来, 人们越来越深切地意识到, 对于系统基本结构单元的性质和规律的了解并不能让我们全面地理解系统的行为. 例如, 单个水分子的性质和特点虽然是理解水的性质和行为的基础, 但单靠分子层次的知识我们不可能完全了解水的性质, 仅仅基于细胞的知识我们也不可能理解组织器官的功能, 生命整体本身并不只是生命物质的简单组合. 进入 21 世纪以来, 对于社会和生命奥秘的探索使人们越来越认识到整体论和系统论的重要性. 整体和系统的世界观和方法论应该真正进入到科学研究当中, 最近二三十年所兴起的关于复杂性的探索和研究就十分具体地体现了这一要求和趋势. 诚如《上帝与新物理学》一书<sup>[1]</sup>中所述, “过去的三个世纪以来, 西方科学思想的主要倾向是还原论. 的确, ‘分析’这个词在最广泛的范围中被使用, 这种情况也清楚地表明, 科学家习惯上是毫无怀疑地把一个问题拿来分解, 然后再解决它的. 但是, 有些问题只能通过综合才能解决. 它们在性质上是综合的或‘整体的’”. 超越还原论是我们认识复杂系统的必由之路.

尽管整体的世界观在中国古代哲学和古希腊罗马哲学中都有所体现, 但现代系统论的形成一般公认为始于贝塔朗菲的著作《关于一般系统论: 基础、

发展和应用》<sup>[2]</sup>. 整体论只是强调了世界是动态统一的观点, 主张从整体上研究系统随时间变化的动态行为, 而系统论对整体动态行为的认识是建立在了了解系统内各部分之间相互作用关系的基础上的, 关注整体与部分之间的关系. 从这个意义上说, 系统论是还原论和整体论的有机结合和辩证统一<sup>[3,4]</sup>. 科学方法论从还原论向系统论的变迁是探索复杂性的方法论基础, 而我们所面临的问题是: 如何在系统论这一基本科学方法论的基础上, 深入开展对复杂系统和复杂性的研究, 推动和促进物理学研究在复杂系统领域中的发展.

## 2 复杂系统与探索复杂性

经过 20 世纪 100 年的科学发展, 人类对于自然的理解获得了巨大的成功. 在微观世界, 我们对物质的构成和基本相互作用有了深刻的认识, 而在宇观世界, 人类对于浩瀚宇宙的演化也有了基本的了解. 目前, 物理学的重点研究领域已经转向与人类生活息息相关的宏观世界, 其研究对象可以一般地称之为复杂系统. 这一领域的时间尺度和空间尺度在我们人类通常的认知范围以内, 但恰恰在这一领域中, 我们仍然面临着许多未解之谜, 包括生命的奥秘和意识的生成.

复杂系统在目前还没有一个被大家公认的科学定义. 它不以系统的物质属性进行区别, 广泛涉及到生命、生态、气候气象、资源环境、人口和社会经济等领域. 我们认为, 系统是否复杂通常是由系统中所包含个体的数量(系统的自由度)以及个体之间的相互作用形式两个因素共同决定的, 如图 1 所示.

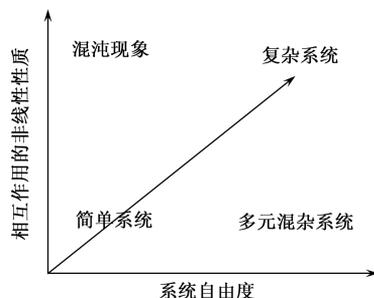


图 1 复杂系统示意图

简单系统处于图 1 的左下角, 系统包含少量的个体, 个体行为受已知的规律支配, 且相互作用是线性的, 单摆就是其中典型的例子. 需要注意的是, 即

使对于小自由度的系统,当系统中存在非线性的相互作用时(处于图1中左上角的位置),它也可以表现出混沌等复杂行为.当系统包含大量的个体,但个体之间的关系为线性、简单、机械的相互作用时,系统处于图1中右下角的位置.此时,我们可以称之为多元混杂系统(complicated system),理想气体是其中典型的例子.系统虽然包括大量的行为相近的气体分子,但分子之间除了完全弹性碰撞外,不考虑任何其他的相互作用.此时,我们可以采用统计平均的方法来研究系统的行为.另一个例子是波音飞机,该系统包含有三百多万个部件,但每一个部件受已知的、机械的规律支配,具有明确的功能.通常,在外界环境改变时,复杂的系统只能对有限的改变做出响应.典型的复杂系统(complex system)处于图1中的右上角.该系统包含大量的个体,而个体之间的相互作用是非线性的.复杂系统的另外一个典型特点是系统中的个体可以具有一定的自适应性,例如组织中的细胞、股市中的股民、城市交通系统中的司机、生态系统中的动植物等等,这些个体都可以根据环境或其他相互作用关系的变化而调整自己的行为甚至是行为规律.显然,系统的复杂性并不一定与系统的规模成正比,复杂系统需要具有一定的规模,但不一定规模越大越复杂,非线性的相互作用以及个体的适应性是决定系统复杂性的重要因素.

复杂系统这一概念可广泛应用于自然和社会各领域.一般来说,复杂系统往往是由大量具有非线性相互作用的个体组成,其突出表现是:在没有中心控制和全局信息的情况下,仅仅通过个体之间的局域相互作用,系统就可以在一定条件下展现出宏观的时空或功能结构,在新的层次上涌现出具有整体性和全局性的性质和功能,这就是所谓复杂系统的涌现性.复杂系统所涌现出来的宏观全局行为,不管其复杂与否,都表现为在个体的微观层次上不可能出现的、系统的整体行为.在这里应该强调的是,非线性的相互作用对于系统宏观行为的出现至关重要,它使得系统的整体行为不能通过个体行为的简单叠加而获得.复杂系统在空间上经常包含不同的尺度,其结构也往往具有多种层次,不同尺度和层次所面临的问题各不相同,不同尺度和层次之间的关系复杂多样,非线性因素的存在使得大尺度上的问题不能简单地通过小尺度的叠加而获得解答,高层次上涌现出来的性质也不能直接从低层次性质中得到解释,因此,探索复杂性不能采取还原论的研究方法,而必须在了解个体行为及其相互作用机制的基础

上,从整体的视角,利用系统论的研究方法来进行探讨.

基于宏观领域复杂系统的一般性,探索复杂性已经成为自然科学与社会科学发展的一个重要基础.探索复杂性时,关心的是涉及复杂系统性质和演化规律的基本科学问题,试图通过对生命生态、资源环境、社会经济等具体系统演化过程中关键问题的研究,揭示复杂系统所具有的一般性规律,研究复杂系统宏观层次上的涌现性行为、系统性质和功能的智能控制等科学问题,并促进对具体系统的认识.

简而言之,复杂性研究关注复杂系统在时间演化过程中所表现出来的丰富多彩的性质和行为,及其背后存在的具有共性的基本规律,特别是复杂系统的涌现性性质.它涵盖了大脑、免疫系统、细胞、蚁群、互联网、金融市场、人类社会等等具体领域,是21世纪基础科学发展的一个重要方向,也是物理学发展的重要领域.Science杂志在1999年就曾发表专辑阐述了复杂性研究对众多学科的可能影响.由于探索复杂性所形成的理论和分析方法在解决复杂系统问题上的前景和威力,复杂性科学还被众多科学家誉为“21世纪的科学”<sup>[5]</sup>.

### 3 复杂网络对于探索复杂性的作用

对于复杂系统的整体涌现性行为,非平衡态统计物理学中的自组织理论从热力学的视角给出了系统产生宏观有序行为的条件和机制,为理解各领域复杂系统的涌现性提供了统一的概念、方法和基础.但当我们希望具体了解各个具体系统的宏观行为时,仅仅靠热力学的知识是不够的,必须针对具体系统应用动力学手段,使用动力学的概念和方法来分析个体行为、相互作用和演化机制.

复杂系统的动力学描述需要刻画个体的动力学行为和个体之间的相互作用关系.前面已经提到,个体之间的非线性相互作用是决定系统复杂性的重要因素,所以,刻画系统中的相互作用关系对研究宏观行为意义重大.在已有的关于复杂系统的研究中,存在两种对相互作用关系的简化处理:(1)全局相互作用:系统中任意一对个体之间都以同样的概率及机制发生相互作用.在这种情况下,在理论上可以用平均场的方法研究系统的涌现行为;(2)规则的相互作用结构:例如把个体置于一维链或二维晶格之上,此时可以用反应扩散方程等方法讨论系统的行为.在以上两种相互作用关系的简化处理中,个体都是同

质的,个体之间的相互作用关系没有差别.显然,这一简化与许多实际系统,特别是生物和社会经济系统的相互作用结构相差甚远.近年来倍受关注的复杂网络研究表明,大量复杂系统个体之间的相互作用关系需要用网络结构来描述,而这些网络结构存在着许多特殊的性质,例如小世界性质、幂律度分布、不同的匹配关系、社团结构等<sup>[6]</sup>.当我们知道相互作用结构对系统宏观行为具有重要影响时,复杂网络研究就成为理解复杂系统宏观行为的基础.

包含大量多个个体和多个个体之间相互作用的复杂系统都可以抽象成为复杂网络,其中每个个体对应于网络的节点,个体之间的联系或相互作用对应于连结节点的边.可见,复杂网络是对复杂系统相互作用结构的本质抽象.虽然每个系统中的网络都有自身的特殊性质,都有与其紧密联系在一起的独特背景,有自身的演化机制,但是把实际系统抽象为节点和边之后就可以用统一的、一致的网络分析方法去研究系统的性质,从而可以加深对系统共性的了解.总的来说,复杂系统的涌现性现象是具有整体性和全局性的行为,不能通过分析的方法去研究,必须考虑个体之间的关联和相互作用,从这个意义上讲,理解复杂系统的行为应该从理解系统相互作用的网络结构开始.所以,虽然复杂网络本身已经成为科学研究的一个重要领域,但从本质上来说,复杂网络是研究复杂系统的一种角度和方法,它关注系统中个体相互关联和作用的拓扑结构,是理解复杂系统性质和功能的基础.

#### 4 国内外探索复杂性的基本尝试

近年来,复杂性研究方兴未艾,已成为国际上科学研究的前沿和热点,许多著名的大学纷纷设立相关的院系及研究机构,研究者来自各个领域,包括物理学家、生态学家、经济学家、各类工程师、昆虫学家、计算机科学家、语言学家、社会学家和政治学家.一场关于复杂性研究的科学竞争已经在世界范围内展开.在探索复杂性的科学研究中,我们认为,欧洲学派的自组织理论和美国 Santa Fe 研究所所倡导的关于复杂适应性系统的研究值得大家关注.

自组织理论创立于上个世纪 60 年代末,核心的内容是 I. Prigogine 创立的耗散结构理论和 H. Haken 的协同学<sup>[7,8,9]</sup>.自组织理论的研究对象就是复杂系统,它关心复杂系统演化所表现出来的多样性和复杂性背后的基本科学问题,其中最为核心的就是时间及其演化.

考察系统的演化,我们可以发现可逆与不可逆两种物理图像以及退化与进化两种时间箭头<sup>[10]</sup>.在我们熟悉的生命生态、社会经济、环境等领域中,处处可以观察到由简单到复杂,由低级到高级,由无功能到有功能到多功能的进化方向<sup>[7]</sup>.而这种时空有序和功能结构的涌现,则是与经典力学和统计物理学给出的结论相悖的<sup>[8]</sup>.如何沟通物理的、量的世界和生物的、质的世界是科学研究的一个重要命题.自组织理论正是在探讨这一问题中产生的.

生命现象是进化进程的典型代表.但事实上,物理的、化学的无生命领域,我们也可以观察到由无序到有序的进化现象,观察到结构和功能的涌现.天空中的云街,岩石中的花纹,低等生物的社会性行为等等,都是系统在某些外在条件下,自发地产生出宏观有序结构的例子.它不同于系统在具有更高组织的环境驱动下,被动地产生某种宏观结构的行为(如搅动液体也会产生出宏观对流),自组织现象的产生根源于系统的内部.研究各领域中自组织现象的共性与规律,并利用相应的概念和方法研究具体系统的自组织行为,就构成了自组织理论的核心内容.以 I. Prigogine 为首的布鲁塞尔学派通过对非平衡系统线性区和非线性区的潜心研究,在“局域平衡假设”的基础上,得到了“自组织”和“耗散结构”的概念.他们指出,当外界环境把开放系统驱动至远离平衡的区域,即超越了 Onsager 关系和最小熵产生定理的适用范围,进入非线性区后,系统的定态可能失稳.系统内部的涨落能驱使它进入具有时间、空间或功能结构的状态,出现“自组织过程”.H. Haken 所领导的斯图加特学派则通过对激光的研究,深入到了自组织过程的内在机制,提出了“序参量”、“伺服原理”等基本概念,指出在系统有序结构形成的临界点处,系统的快变量会受到慢变量的制约,系统杂乱无章的运动将被统一的协同运动所取代.

自组织理论的研究和成就不同于科学史上发现一条定律或定理,发现某个天体或基本粒子,它的成就就在于以非平衡的热力学为基础,开拓了一个新的领域——研究世界复杂性的领域,它对人们的世界观和科学研究有深远的影响,有广阔的发展前景.可以说,这一理论使我们认识到了不同领域复杂系统演化过程中遵从着普适的规律,从而奠定了探索复杂性的科学基础.正是在此基础上,I. Prigogine 和他所领导的小组进一步对气象系统、生态系统、生命系统及经济系统等方面展开积极的研究并取得了实质性的进展.例如,他们用一组宏观量描述地球—大气—低温层体系,给出

了大气和海洋湍流的动力学机制<sup>[7]</sup>,从根本上改变了气象预报的基本概念,并已于上世纪90年代进入到实际的气象预报系统的建设中.在生态研究中,以纽芬兰渔场为例,讨论了渔场资源、鱼类种群和渔业活动的综合演化关系,讨论了多组渔民在交换多个区域的不同鱼类资源信息情况下的捕鱼行为和鱼类种群的演化规律.在考虑人的主观因素对复杂系统演化的影响后,把理论结果运用到实际系统中,取得了很好的效果.在经济复杂性的研究中,对美国城市沿革,比利时交通,荷兰的能源演化也给出了定量的演化结果.德国的 H. Haken 等人在协同学的基础上发展出定量社会学,还研究了意识的形成和大脑的工作方式,并取得成果.

但正如我们在前面提到的,自组织理论仅仅从热力学的视角,给出了系统产生宏观有序行为的条件和机制,但当我们研究具体系统的宏观行为时,必须针对具体系统应用动力学手段,分析个体行为、相互作用和演化机制.自组织理论提供的动力学研究方法局限在宏观或中观层次上,并且要求使用严格的动力系统或随机过程等数学语言来描述,这就大大限制了研究范围.因为许多实际系统中的个体是适应性的,个体之间的相互作用也未必能够用严格的动力学语言来描述.上个世纪80年代末,在 M. Gell-Mann, P. Anderson, K. Arrow 等诺贝尔奖得主倡导下, Santa Fe 研究所成立于美国新墨西哥州,该研究所特别注重多学科交叉,主要开展复杂性研究.他们在90年代提出了复杂适应性系统理论,注重个体的主动性、能动性,强调个体之间、个体与系统之间、系统与环境之间的相互影响和相互作用,认为这是系统主导系统发展与演化的重要因素<sup>[11]</sup>,在此基础上探索微观个体的行为及其在宏观上涌现出的新特征.该所还设计了相应的计算机软件 SWARM 等,并予以实施.他们的研究涉及到生命、生态、经济和网络等领域.

事实上,复杂适应性系统理论可以作为近年来被广泛应用的基于主体的建模方法(agent based modelling, ABM)的一个特例.我们知道,复杂系统的一个突出特征是基于微观个体相互作用的宏观涌现性,其中涉及系统微观和宏观相关关系这一基本问题.自组织理论中动力系统的建模方法本质上属于自上向下(up-down)的建模方法,首先确定描述系统宏观状态的变量及其演化规律,然后研究系统宏观状态在不同环境、条件下的涌现行为.而基于主体的建模方法则属于自底向上(bottom-up)建模方法,该方法是从组成系统的基本单元——主体

(agent)出发,首先建立个体的行为规则、学习适应机制和相互作用机制,在此基础上探讨由于个体之间的关联和作用所导致的系统的宏观行为.在计算机数值模拟技术的支持下,这一研究线路大大拓展了探索复杂性的研究对象和应用领域.

我国的科研工作者也积极参与了探索复杂性的科学研究,并取得了一些成果.钱学森院士早在上个世纪80年代中期就洞察到了这个科学方向的重要性,积极推动了系统科学的学科建设,并提出了复杂性研究的独特思路和方法论,包括从定性到定量综合集成的研究方法.还有不少科研工作者在非平衡系统理论、社会经济系统复杂性、生命和生态系统复杂性等方面,独立开展工作并取得了一些成果,得到了国际同行的认可.

目前,国际、国内进行复杂性研究的工作都是针对具体系统进行的,寻找复杂系统的一般规律可以说还任重道远.我们认为,这是复杂性研究的一个必不可少的阶段.首先,由于复杂系统的特征如不可逆性、涌现性、敏感性和路径依赖等表现出了很强的普适性,我们相信其中一定存在着普适的、制约不同系统演化的基本规律,这是探索复杂性的基础;其次,通过从理论到理论的途径很难直接产生理论成果,普适的规律一定是通过对各种各样的具体系统的深入研究而获得的,这就要求我们一定要走进去,准确地把握相关系统的概念,深入细致地了解系统的性质;第三,在准确把握概念和性质的基础上,对具体系统的研究不能落入已有思想和方法的束缚之中,要注意应用系统论——还原论和整体论的有机结合,研究相应的复杂性问题;第四,在获得对具体系统的成果后还一定要注意走出来,注意通过对具体系统的研究,提炼出具有普适性的规律,通过对不同系统的研究,促进对复杂性本身的认识,从而建立对复杂系统的一般认识.

在以上的基本研究思路下,我们应特别关注复杂系统在时间演化过程中所表现出来的丰富多彩的性质和行为,以及其背后存在的具有共性的基本规律.注意将理论探索与具体领域的研究紧密结合起来,一方面,利用系统科学的思想、方法和工具研究经济、资源环境、生物、计算机系统等领域中的相关问题;另一方面,注意从具体问题中提炼出具有共性的规律性的东西,研究系统宏观层次上的涌现性行为以及对系统性质和功能的智能控制,发展复杂性研究的基本概念和理论.

## 5 结束语

复杂系统研究已经成为物理学发展的一个重要方向。Science 杂志在 1999 年就曾发表专辑阐述了复杂性研究对众多学科的可能影响。2004 年,中国科学院在对基础研究的长期规划中,确定复杂系统研究为 14 个重点领域之一。国务院 2006 年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》多次论述了系统科学和交叉学科,明确指出“复杂系统、灾变形成及其预测控制”是面向国家重大战略需求的基础研究,要求“重点研究工程、自然和社会经济复杂系统中微观机理与宏观现象之间的关系,复杂系统中结构形成的机理和演变规律,结构与系统行为的关系,复杂系统运动规律,系统突变及其调控等,研究复杂系统不同尺度行为间的相关性,发展复杂系统的理论与方法等。”可见,复杂性研究以及交叉学科对我国中长期科学发展的重要意义已经逐渐被大家所认识和接受。从物理学发展的角度讲,在我们了解微观世界的物质结构和宏观世界的宇宙演化后,宏观世界中的复杂系统无疑将成为物理学发展的一个重要领域,而物理学在这一领域内的发展,将有助于我们进一步了解生命的奥秘。

### 参考文献

- [1] [英]P. 戴维斯著. 徐培译. 上帝与新物理学. 长沙:湖南科技出版社,2007. 52 [Davies P, Xu P trans. God and the New Physics. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2007. 52 (in Chinese)]
- [2] [美]L. 贝塔朗菲著. 林康义等译. 一般系统论:基础、发展和应用. 北京:清华大学出版社,1987 [VonBertalanffy L. Lin K Y trans. General system theory: Foundations, Development,

Applications. Beijing: Tsinghua University Press, 1987 (in Chinese)]

- [3] 北京大学现代科学与哲学研究中心编. 复杂性新探. 北京:人民出版社,2007 [Research Center of Modern Science and Philosophy, Peking University. New Investigation on Complexity. Beijing: China People's Publication House,2007 (in Chinese)]
- [4] 钱学森著. 创建系统学(新世纪版). 上海:上海交通大学出版社,2007 [Qian X S. Creating Systematology (New century edition). Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press,2007 (in Chinese)]
- [5] 戴汝为. 自然杂志,1997(4):187 [Dai R W. Nature Magazine, 1997(4): 187(in Chinese)]
- [6] 郭雷,许晓鸣主编. 复杂网络. 上海:上海科技教育出版社,2006 [Guo L, Xu X M eds. Complex Networks. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2006 (in Chinese)]
- [7] G. 尼科利斯, I. 普里戈金著. 徐锡申等译. 非平衡系统的自组织. 北京:科学出版社,1986 [Nicolis G, Prigogine I. Xu X S Trans. Self-organization in Non-equilibrium Systems. Beijing: Science Press, 1986 (in Chinese)]
- [8] G. 尼科利斯, I. 普里戈金著. 罗久里等译. 探索复杂性. 成都:四川教育出版社,1986 [Nicolis G, Prigogine I. Luo J L et al. trans. Exploration of Complexity. Chengdu: Sichuan Education Publishing House, 1986 (in Chinese)]
- [9] H. 哈肯著. 徐锡申等译. 协同学引论. 北京:原子能出版社,1984 [Haken H. Xu X S et al. trans. Introduction to Synergetics. Beijing: Atomic Energy Press. 1984 (in Chinese)]. H. 哈肯著. 郭治安译. 高等协同学. 北京:科学出版社,1989 [Haken H. Guo Z A. trans. Advanced Synergetics. Beijing: Science Press,1989 (in Chinese)]
- [10] 沈小峰,胡岗,姜璐编著. 耗散结构论. 上海:上海人民出版社,1987 [Shen X F, Hu G, Jiang L. Dissipative Structure Theory. Shanghai: Shanghai People's Publishing House,1987(in Chinese)]
- [11] J. 霍兰著. 周晓牧等译. 隐秩序:适应性造就复杂性. 上海:上海科技教育出版社,2000 [Holland J. Zhou X M et al. trans. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press,2000 (in Chinese)]

## • 物理新闻和动态 •

### 激光聚变

美国研究人员声称他们在激光聚变方面已取得关键性的突破,并预期在 2010 年年底之前创造出发生持续核反应的条件。美国的国家点火装置(NIF)2010 年发表了第一个科学实验结果,其中激光强度创造了新的世界记录。

国家点火装置超过预算 4 倍并且比计划落后了 5 年,该装置自从 2009 年 3 月在 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)开始运行以来,一直承受着压力。国家点火装置的主要目标是将几束能够产生 180MJ 能量的激光(比现有的激光装置能量高 60 倍)射向一个直径为 2mm 的空心铍球。

将所有的能量沉积到一个很小的体积上,将小球内的氘和氚挤压到一起,发生点火。这是氘和氚发生持续的核聚变并产生多余能量的关键。

国家点火装置的科学家用 192 束激光同步地打那些小靶,在 100 亿分之一秒的时间内在靶中沉积 680kJ 的能量。这比以前实验中的功率大 20 倍以上。

国家点火装置项目是由美国政府、工业和学术界合作进行的,目的在于保护国家和全球的安全。近期内的一种应用是利用该装置验证核武器的计算机模拟,以确保美国的核武库是安全的。长期计划是希望国家点火装置能够导致实际的聚变能。研究论文发表在 Science (2010,327:514)上。

(树华 编译自 Physics World News, 29 January 2010)