

非线性科学——21 世纪极富挑战性的研究

Prospects for Nonlinear Science

范 萌

(北京大学力学系, 博士 北京 100871)

编者按 全国第二届青年学术年会, 于今年7月中旬在京举行。这是中国科协为全国青年科技工作者提供的两年一度的大规模科学论坛。这次在年会上发表的大量新论文、新成果, 生动地反映了我国广大科技新秀们脚踏实地、勇于探索、勇于突破的科学精神和风貌。本刊将陆续选登其中一些论文, 以飨读者。

这篇“非线性科学——21 世纪极富挑战性的研究”, 以及后面的4篇: “空气中非线性声学研究”、“21 世纪多相流热物理学科的未来与挑战”、“流体地质学——21 世纪的新兴地质学科”、“空间实验化学——材料科学、场化学与空间化学的交叉”, 是我国基础研究领域中一批青年学者对当代一些学科前沿问题研究的新认识。这几篇文章从某种程度上反映了我国青年科学家们勇于介入世界科学前沿的一种睿智、眼光和敏锐, 值得一读。

一、非线性科学的产生

科学的发展经历了从不断积累到综合的波澜起伏的过程, 同时也不断地改变人们观察自然界的方法和思维方式。

由伽利略—牛顿所创立的经典力学是确定论描述的典范, 它在天体运行规律的研究方面所取得的辉煌成就使得人们认为经典力学无所不能, 当时著名天文学家拉普拉斯自豪地宣称, 只要给定了“起始条件”, 就可预言太阳系的整个未来。这就是所谓“机械(力学)决定论”的观点。它认为, 应用牛顿所发现的诸定律, 可以精确计算宇宙所有事物的运动。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。这种机械决定论的观点因为海王星的按“定律预见”的发现而登峰造极。19 世纪 20 年代能量守恒与转化定律的发现, 揭示了各种物质运动形式之间的转化关系, 把力学、热学、电学、化学等联系在一起, 牛顿力学遂成为各门科学的理论基础。这样大至日月星辰, 小至原子分子, 似乎无不被牛顿理论体系所包罗。然而事情并非尽善尽美, 19 世纪末叶已经知道, 描述三个以上天体运动的方程组“不可积分”, 更不

能解析求解。到了 20 世纪初, 量子力学、相对论的创立, 微观粒子的波粒二象性和测不准原理的发现, 揭示了时间和空间、物质和运动以及它们同时间、空间的有机联系, 揭示了微观世界中波动性和粒子性、连续性和间断性以及必然性和偶然性之间的辩证关系, 使人们认识到客观世界是复杂的, 自然界中除了牛顿力学支配的确定论过程之外, 还存在大量的随机过程。

19 世纪, 生物学取得了巨大的进步, 从宏观上弄清了遗传物质的基础是基因, 发现了细胞及其各部分的功能, 创立了生物进化学说。20 世纪以来, 化学和物理学有了飞跃发展, 并渗透到生物学中, 导致了分子生物学的诞生, 使生物学进入定量的、分子水平的阶段, 取得了一系列震惊世界的科学成果。特别是遗传密码的破译, 敲开了生命科学的大门。科学技术划时代的进展, 揭示了物质世界不同层次的运动规律和相互联系, 同时也暴露出了一些矛盾, 天体演化和生物进化过程中“时间之矢”的箭头向着从简单到复杂, 从无序到有序的演变, 这与热力学根本大法之一——热力学第二定律支配的孤立系统演变正好相反。按热力学第二定律, 孤立系统总是朝着均匀、简单和消除差别的方向发展, 即从有序到无序, 最后达到系统处处无差别, 死寂一片。生物系统不断进化和热力学系统不断退化这

一矛盾,长期引起人们对物理学规律是否适用于生物学系统的怀疑。

纵观 300 多年来科学的发展,已经历了两个关键时期,一是牛顿的经典力学体系,它支撑在一个均匀的、没有演化的静止的宇宙模型之上,物质、空间和时间是没有内在联系的,未来包含在过去之中;二是爱因斯坦相对论的宇宙模型和四维空间,物质和时间紧密地联系在一起,空间和时间就是由物质产生的,自然法则是简单、美丽、和谐的统一,未来是可以预测的,而将随机性引入科学的概率论描述自然界则是不得已而为之的补充。现在我们正在步入第三个关键时期,不可逆性遍布于自然界和人类的许多方面,时间与演化联系在一起,呈现在眼前的是从无序与有序,由简单性与复杂性、确定性与随机性交织在一起的千变万化的自然景象。最近 20 多年发展起来的非线性科学所面临的正是这个开放、演化的真实世界。

长期以来,对非线性问题的研究一直分散在自然科学和技术科学的各个领域。从 19 世纪末庞加莱开始算起,促进非线性科学发展的有微分方程定性理论,无线电技术所需要的非线性线路理论,还有数学中动力系统理论,以及统计物理中不少成果,如重整化理论。在本世纪 60 年代中期,几乎同时从非线性系统的两个极端方向取得了突破。一方面从可积系统的一端,在浅水波方程中发现了异常稳定并具保守性质的“孤子”解,从而启发人们找到了求解一大类非线性偏微分方程的普遍途径,即所谓“散射”反演方法。另一方面从不可积系统的极端,在天文学、气象学、生态学等领域对一些相对简单的不可积系统的研究中,都发现了确定性系统中存在着对初值极为敏感的复杂运动形式——混沌。这两个突破均依赖于计算机应用的帮助。它使得科学家有了强有力的数值计算工具,同时也为非线性现象和理论分析提供了新的思想来攻克以往用解析手段不能处理的非线性问题,从中得出规律性认识,打破原有的科学界限,从共性、普适性的角度来探讨各种非线性系统的行为。这样就形成了贯穿信息科学、生命科学、空间科学、地球科学和环境科学等领域,解析、计算和实验三种手段并用,揭示非线性系统共性,探索复杂性的基础性跨学科前沿领域——非线性科学。

二、非线性科学研究的意义和展望

近 20 年来非线性科学在探求非线性现象的普遍规律、发展处理它们的普适方法方面已取得了明显的成就。这首先表现在自然科学领域:相干结构和孤子揭示了非线性作用引起的惊人的有序性;确定性系统的混沌使人们看到了普遍存在于自然界

而人们多年来视而不见的一种运动形式;分形和分维的研究把人们从线、面、体的常规几何观念中解放出来,而面对更为多样而真实的自然;自组织现象和图形生成反映非线性地耦合到一起的大量单元和子系统中由于有序和混沌竞争而形成的时空组织或时空过程。这些在非常不同的学科领域内发现的非线性现象的共同特征,使一个学科内的进展能很快向其它领域转换,同时也证实了非线性科学促进学科间互相渗透的跨学科特征。

自非线性科学确立以来混沌现象一直是其研究的中心课题,混沌理论的发展对于数学、物理学多个分支都有影响,它对力学的意义在于,过去总是将牛顿力学和“决定论”相联系,现在我们却知道由牛顿定律运动方程确定的状态,可能由于方程具有内在随机性而在动态上实际不可预测,它只有某种统计特征。在分析力学方面,混沌理论指出它发展的新途径,高维非线性系统的方程不仅不能积分,而且其解可能对初值有敏感依赖性,因而得用类似统计力学的观点去处理。在流体力学中,湍流的产生机理是个百年难题,它千姿百态、瞬息万变和神态莫测,是自然界中复杂现象的集中表现,描述流体动力学的方程既包含了无穷维的耗散项,又包含了大中小许多不同尺度的运动。也就是说湍流在时间和空间两方面都表现出随机性,它是非线性连续系统在一定条件下的内秉特性,因此确定性和随机性、有序和无序等截然不同的现象由同一组确定性方程演化出来,混沌理论已为湍流研究开辟了一条新的思路。

分形作为非线性科学研究的又一重大内容,把人们引入了对现实世界不规则几何体的探索,如蜿蜒曲折的海岸线、美丽的雪花冰晶,它们无论怎样放大来看,都如同原来那样复杂(自相似),必须用分维数去度量,这样就意味着完全否定了分形的平滑程度,分形是处处不可微分的,而数学作为专门研究量与形的变化规律的独立学科,其微积分和级数的概念均是基于局部性、光滑和线化的。此时传统数学的解析方法已几乎无能为力,而实验数学则开创了非线性科学研究的新途径。可以期盼,步入 21 世纪后,伴随着非线性科学的发展,实验数学将愈益重要,研究全局和非线性量与形的新的数学工具也将伴之而生,从而可能改变整个数学这个既古老、又现代的科学皇冠的面貌!

非线性科学不仅具有重大的科学意义,而且对人类社会、生态环境、医学诊断、经济发展规律、信息与决策等都有不可估量的影响,不考虑非线性因素、不建立非线性模型就无法真实准确地反映客观规律,非线性科学的研究无疑对社会的进步与发展有着积极的推动作用。

非线性科学的研究不仅对整个自然科学而且

对哲学体系也带来了巨大的冲击,可能成为产生变革的持久的动力,无疑将在人类探索自然的实践中起着开阔眼界、解放思想的作用。从哲学上说,混沌研究很可能有助于消除对于统一的自然界确定论和概率论两套对立描述体系之间的鸿沟,深化对于偶然性和必然性这些哲学范畴的认识,而相干结构和自组织现象及图形生成的研究则为量变引起质变、有序和无序的相互转换提供了活生生的丰富事例,同时简单性与复杂性、局部与整体、有限与无限等重要的哲学概念、范畴和基本内容受到非线性科学发展的冲击,需要重新认识和深化。非线性科学将通过一系列重大发现和成果直接影响人们的思维方法,从而推动哲学的变革。

有人认为,非线性科学将成为继量子力学、相对论之后的又一次新的科学革命。即使可能不至于此,但至少我们确信,非线性科学所引入的基本概念,对自然科学、人文科学乃至哲学领域产生了深刻的影响,并将会持久地影响人类科学的进程。

三、对 策

1、提倡跨学科合作 非线性科学是横跨多种学科门类的新兴领域,它的发展实际上是多种学科的相互渗透、相互促进和综合的过程,只从一门学科的专门知识出发,就很难全面、正确、快速地掌握自然界运动的规律。需要在正确的认识论和方法论

的指导下,由多种学科的专家协同作战、共同研究,采取百家之长,集思广益,发挥学科间的杂交优势,鼓励新概念和新方法在不同学科之间的推广和应用,以促进非线性科学的发展。

2、培养中青年综合型科研人才 培养从事非线性科学研究的中青年科研人才是刻不容缓的,它将直接影响到我国下世纪科学技术的发展能否跟踪世界先进水平。我国需要培养一代从学校起就了解线性与非线性、确定论与随机论,熟悉非线性现象和基础研究方法的年轻人,他们应当跨越学科界限,具有扎实的数理基础,掌握计算机操作与计算方法,既具有综合本领又具有分析能力,既能从整体、全局观察事物的本质,又能熟练地解决具体的实际问题,而这些能力单从学校学习是不够的,还需要积极参与具体的科研实践才能逐步达到。

3、宽松的管理原则 非线性科学是正在迅速发展的基础研究领域,而基础研究是没有特定商业目的的、非赢利的、以创新和探索知识为目标的研究,因而对非线性科学研究不能有急功近利的指导思想,对它过早地提出实用要求只会起到阻碍学科发展的作用,这里重要的是鼓励人们去发现和认识未知的现象和规律,而这正是人类认识和改造自然的活动中最关键的一步。因而对于非线性科学的管理原则应是不作具体要求和设定时间限制的,不应急于评价,同时却应该公开并鼓励国际间广泛的交流。

(责任编辑 王宏章)

(上接第9页)

在数学模型与数值计算方面须研究:多相流理论模型、基本控制方程与闭合条件、离散化方法及离散化方程求解、计算程序和多相流诊断技术及专家系统。

在机理性研究的基础上,发展包括影响因素在内的比较全面、预测结果比较准确的大型成套两相流与传热应用软件,为工程设计和自动控制等提供依据。加强基础理论与工程应用相结合的研究,也是目前多相流研究的一个重要方面。

在非牛顿流体与油气水三相流方面须研究:非牛顿流体多相流的流动、输送、分离与传热特性;油气水超长距离混合输送问题;油、气、水、砂的气液、液固分离技术;油井井芯内流型转变及压力、温度沿井深变化规律;液固两相流中流动、结渣、腐蚀和磨损机理;气液固三相流动传热强化及除垢机理;多相多组分流体混合与分离新理论与新技术;非约束性流道内多相流体流动与传热特性等。

除了针对火电、核电、石油、化工等常规工业发展的要求开展上述多方面稳态和瞬态过程的两相与多相流动与传热传质过程规律外,为适应航天、航海、微电子、智能化机器制造业、新兴材料工业的发展,必须有前瞻性地开展复杂、超常、特殊过程中的两相与多相流动、传热的新理论新方法,解决超高热负荷、超高能密度、微重力等恶劣条件下的器件冷却问题。

在多相流测量新技术方面须研究:多相流多维空间流场和激光测量技术;多相流流场高速动态分析与图象处理技术;多相流中密相系统参数测量和颗粒示踪技术;汽液两相流各种特性参数无干扰测量技术;汽液、气固两相微波检测原则与应用技术;煤燃烧气化中气固两相流多媒体测量技术;油气水多相流在线流量计量技术等。

(责任编辑 王宏章)