

复杂性科学发展的一个里程碑 ——2021年诺贝尔物理学奖解读

陈晓松¹ 樊京芳¹ 刘卯鑫²

(1. 北京师范大学系统科学学院 100875; 2. 北京邮电大学理学院 100876)

1. 还原论到复杂性科学

2021年诺贝尔物理学奖授予了三位科学家,分别是美籍日裔科学家真锅淑郎(Syukuro Manabe)、德国科学家克劳斯·哈塞尔曼(Klaus Hasselmann)和意大利科学家乔治·帕里西(Giorgio Parisi),以表彰他们“对我们理解复杂物理系统的开创性贡献”。这标志着人类对世界的探索,已从还原论为主导,逐步过渡到与复杂性研究并重的新阶段。

将研究对象还原成多个组成部分及个体,是还原论的核心思想和理念。它基于对个体的深入研究,从而掌握和理解研究对象整体的性质与行为。还原论思想可以追溯到古希腊时期。古希腊哲学家、数学家毕达哥拉斯(约公元前580~前500)认为世界万物由“数”及“几何点”构成。后来,希腊哲学家德谟克利特(约公元前460~前370)将几何点与原子概念结合起来,认为世界由原子与虚空构成,万物由原子演化而来。

德国天文学家开普勒深受毕达哥拉斯的影响,坚信世界按照完美的数学原则来构造,以数学的和谐来探索宇宙体系,发现了行星运动的三大规律,为牛顿创立天体力学理论奠定了基础。18到19世纪,牛顿力学的盛行使得还原论达到了一个高峰。20世纪,以原子结构的研究以及微观粒子的探索为标志,还原论指导下的科学研究达到了一个顶峰,建立了量子力学、粒子物理和标准模型等物理学基本理论。

但是,大量个体构成复杂系统的行为,并不是个体性质的简单之和,会呈现关联、合作、涌现等集体行为。正如1977年诺贝尔物理学奖获得者安德森(Philip W.Anderson)1972年在标题为“More is different”的*Science*文章^①中所表述的那样,将万事万物还原成简单的基本规律,并不意味着从这些规律出发能够重建宇宙。不能依据少数个体的性质简单外推出多个体复杂系统的行为。相反,复杂系统在不同层次会呈现全新的性质,研究和理解此类涌现行为,就其基础性而言,与其他研究相比毫不逊色。

复杂系统普遍存在于自然界和人类社会,从复杂物理系统到生物系统、生态系统、网络系统、社会经济系统等。大脑作为海量神经元组成的复杂系统,其感知和记忆功能等涉及系统的集体和涌现行为^②。进一步,人类的认知与教育活动,也涉及各类复杂性,教育已被作为复杂系统来进行研究^③。在还原论思想指导下,一方面科学取得了巨大的进步与发展,另一方面也使得学科越分越细,科学家在非常狭窄的领域知道得越来越多,造成了科学信息的过载和流动壁垒,许多研究领域的局限性越来越显著,发展遇到瓶颈,迫切需要发展从个体性质获得系统整体性质的复杂性科学(Complexity Science)^④。

复杂性科学兴起于20世纪80年代,致力于研究复杂系统的结构与功能关系,以及演化和调控规律,是一门新兴的交叉性、综合性学科,也是当代科学发展的前沿领域之一。20世纪80年代初,包

括1969年诺贝尔物理学奖获得者盖尔曼(Murray Gell-mann)在内的一批不同领域杰出科学家在美国新墨西哥州成立的从事跨学科研究的斯塔菲研究所(Santa Fe Institute),是复杂性科学兴起的一个标志性事件。后来,该研究所一直能聚集一批又一批从事物理、经济、生物和计算机科学的研究人员,一起合作开展跨学科的复杂性科学研究。

复杂系统科学的发展,不仅能够带来自然科学的变革,弥补人类对自己所处宏观尺度科学规律认识的不足,而且可以渗透到社会复杂系统及社会科学的研究。英国著名理论物理学家霍金在2000年曾表示:“21世纪是复杂性科学的世纪”。复杂性科学以不同领域的复杂系统为研究对象,从系统和整体的角度,探索复杂系统的性质和演化规律,目的是揭示各种系统的共性及其演化过程遵循的共同规律,发展优化和调控系统的方法,为复杂性科学在物理系统、地球系统、社会经济系统、生物系统及医学等领域的应用提供理论依据,以应对当前自然和社会各方面的巨大挑战,是人类当前需大力发展的前沿科学领域。

2. 统计物理学与复杂系统

依据系统个体的性质及其相互作用推算出系统整体的行为和特性,是物理学重要分支——统计物理承担的使命。作为统计物理学基础的气体动力学理论萌芽于18世纪。瑞士科学家伯努利(Bernoulli)那时就将气体看作运动的粒子,并导出了气体的压强公式。19世纪中叶,德国物理学家克劳修斯(Rudolf Julius Emanuel Clausius)发表了两篇气体动力学的奠基性文章,引入概率和统计方法研究气体系统,提出了气体分子平均自由程的概念。在这些研究的基础之上,英国物理学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell)导出了气体分子速率的分布函数。受麦克斯韦工作的启示,奥地利物理学家玻尔兹曼(Ludwig Edward Boltzmann)扩展了气体分子的分布函数,进一步发展了气体动力学理论,给出了热力

学第二定律的统计解释及熵的概率表示。

气体动力学理论发展到统计物理学,虽然都采用概率和统计方法,但应用的对象有一个关键性的跨越。气体动力学考虑分子状态的概率分布,而统计物理学讨论系统全部分子状态集合的概率分布,这个跨越由美国物理学家吉布斯(Josiah Willard Gibbs)于19世纪末至20世纪初实现。在吉布斯建立的系综理论中,直接研究系统的微观态(microstate),即系统全部个体状态的集合。一个微观态可用一个高维矢量来表示,对应于相应高维相空间(phase space)中的一个点。在一定宏观条件下,系统微观态的集合就构成了相空间中的一个系综,并用微观态概率分布函数来描述。原则上,采用微观态概率分布函数进行系综平均可得到系统的宏观性质。吉布斯建立统计力学的相关工作最终被总结在1902年出版的*Elementary Principles in Statistical Mechanics*一书^⑤。

一般来说,系统微观态概率分布函数是未知的。但当系统处于平衡态的时候,吉布斯给出了如下三种不同物理条件下的微观态概率分布函数:1)在粒子数 N 、体积 V 、能量 E 固定的条件下,得到平衡态系统的微正则系综,其微观态概率分布函数为常数;2)在粒子数 N 、体积 V 、温度 T 固定的条件下,得到平衡态系统的正则系综,其微观态概率分布函数正比于 $\exp(-E/k_B T)$,这里 k_B 为玻尔兹曼常数;3)在体积 V 、温度 T 、化学势 μ 固定的条件下,得到平衡态系统的巨正则系综,其微观态概率分布函数正比于 $\exp(-E/k_B T + \mu N/k_B T)$ 。在系统能量函数及哈密顿量已知的情况下,利用上述微观态概率分布函数可以计算系统的平衡态热力学性质。

上述对统计物理学建立做出了巨大贡献的科学巨匠们,克劳修斯和麦克斯韦的工作完全属于气体动力学理论,玻尔兹曼的研究已居于气体动力学理论与统计物理学之间,吉布斯的研究则完全属于统计物理学,他建立起了统计物理学的理论框架^⑤。特别还想指出的是,爱因斯坦在1905物理学奇迹年

发表五篇意义非凡的论文之前,1902到1904年他连续在当时著名的德语物理杂志 *Annalen der Physik* 上发表了三篇文章^{⑥⑦},分别讨论热平衡和热力学第二定律的动力学理论、热力学的基础和热的一般分子理论。爱因斯坦这三篇文章不仅为他1905年两篇关于光量子 and 布朗运动的论文奠定了基础^⑧,而且被认为已经包含了建立统计力学的基本构想^{⑨⑩}。那么,为什么会很少人阅读了爱因斯坦的这些文章且低估了他对统计力学建立的贡献?这个状况实际由爱因斯坦自己造成的,他自认为吉布斯的统计力学理论框架要优于他的,而且在与同行书信讨论中非常明确地予以表述。吉布斯被爱因斯坦称为“美国历史上最伟大的头脑”。

但是,爱因斯坦对统计物理学的贡献还在继续,1910年他提出了临界现象中的临界乳光理论,1924年发表论文预言^⑪:玻色子冷却至非常低温时,会凝聚到能量最低的量子态,因此会出现一种新的物态和相变,被称为玻色-爱因斯坦凝聚态和相变,提出了一种全新的相变和临界现象。

在不同物理条件下,大量个体组成的系统会呈现不同的相。例如,简单原子、分子组成的系统在不同温度和压强下,会形成气相、液相和固相等。一些特殊原子、分子还会形成铁磁、铁电、超导、超流等物相。荷兰物理学家范德瓦尔斯1873年在其博士论文提出的气体状态方程,能够定性描述气液相变,为此获得第一个理论方面的诺贝尔物理学奖。著名理论物理学家朗道提出相变由被称为序参量的特征量描述。根据序参量在相变点的变化特性,相变被分为不连续和连续两类。当序参量在相变点有一个跳跃时,系统发生不连续相变。连续相变又被称为临界现象,其序参量在相变点连续变化,但系统关联长度会趋于无穷大,从而热力学量趋于无穷大或出现奇异性,系统呈现引人入胜的奇妙现象。例如,原来透明的气体或液体,在接近临界点的时候,会产生临界乳光,呈现一片乳白色。热力学量在临界点附近具有标度性和普适性。

1920年,德国物理学家 Wilhelm Lenz 为了研究铁磁相变,提出了系统哈密顿量如下的模型

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} s_i s_j, \quad (1)$$

这里 $s_i = \pm 1$ 表示磁性分子的自旋,处于最近邻的磁性分子之间存在铁磁相互作用,即自旋相同时的能量为 $-J$,相反时的能量为 J 。1925年,Lenz 教授的学生伊辛(Ising)在其博士论文中研究了此模型,并得到一维情形的精确解^⑫。这个后来被人们冠名为伊辛模型的统计力学模型,是被研究最多的物理模型。1944年,美国物理学家拉斯·昂萨格(Lars Onsager)得到了无外场二维伊辛模型的解析解,以及该模型连续相变的临界指数精确值,对相变与临界现象研究的发展起到了里程碑式的作用。

2.1 自旋玻璃

伊辛模型是一个完全理想化的模型,系统的个体规则地分布在晶格上,且具有完全相同的相互作用。但是,实际的物理系统一般不是这样,充满着无序性。例如,自然界中广泛存在的非晶态物质,它们展示丰富多彩的各种物质形态^⑬。

为了研究无序系统,1975年著名物理学家 Edwards 和 Anderson 提出了自旋玻璃模型(EA模型)^⑭

$$H = - \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} s_i s_j, \quad (2)$$

其中,处于最近邻的自旋 s_i 与 s_j 有相互作用 J_{ij} ,它是一个随机变量,其概率分布为服从高斯分布。 J_{ij} 可正可负,系统中同时存在铁磁和反铁磁相互作用,阻挫(frustration,也即令人沮丧之物景)常会出现,此时系统将存在大量的亚稳态。如同帕里西等人在介绍自旋玻璃的著作^⑮中写道,研究自旋玻璃就像观看莎士比亚戏剧中的人类悲剧。如果你想同时与两个人交朋友,但他们彼此讨厌,那可能会令人沮丧。

如果自旋之间相互作用是有无限长程的,即每个自旋与系统其他自旋都有相互作用,EA模型就

成为平均场自旋玻璃模型(SK模型)^⑩。

2.2 复本对称

根据朗道的相变理论,相变由序参量表征。若存在无序,序参量将变得非常复杂。基于Edwards和Anderson提出的复本技巧(replica trick)^⑪,帕里西对自旋玻璃模型(2)引入了一个新的序参量,即纯态 α 和 β 交叠序参量(overlap order parameter)^⑫

$$q_{\alpha\beta} = \frac{1}{N} \sum_i [m_i^\alpha m_i^\beta], \quad (3)$$

其中 $m_i^\alpha = \langle s_i^\alpha \rangle$ 表示第 α 个复本中第 i 个自旋的局域磁化强度。如果 $\alpha=\beta$,公式(3)就给出了Edwards-Anderson序参量 q_{EA} ^⑬。

一般情况下, $q_{\alpha\beta}$ 是一个 $n \times n$ 的矩阵,被称为交叠矩阵(overlap matrix)。为了计算自由能,采用鞍点方法(saddle-point method),需要找到一个 $q_{\alpha\beta}$ 矩阵使得自由能函数取极值(一阶导数为零)。这意味着需要求解 $n \times (n-1)/2$ 个方程($q_{\alpha\beta}$ 矩阵是对称的)。直接解析求解这么多方程几乎是不可能的,必须理论上假设 $q_{\alpha\beta}$ 的形式以简化计算。最简单的假设就是所谓的复本对称(replica symmetry),即交换复本不会改变 $q_{\alpha\beta}$ 矩阵。在复本对称假设下,只有一个独立序参量,即 $q_{\alpha\beta}=q$ 。帕里西的重要贡献之一是基于复本理论(replica theory)精确求解了SK模型^⑭,得到了 H 的极小值为 $H = -0.7633 N^{3/2}$ 。

帕里西对于自旋玻璃模式严格求解的理论和思维已被广泛地应用在很多无序体系,包括玻璃化转变、物种的进化、人脑的建模、机器学习模型等,可以帮助全局性地理解复杂系统中无序与涨落的相互作用。

2.3 乔治·帕里西简介

乔治·帕里西是意大利理论物理学家,1948年出生于罗马,1970年在尼古拉·卡比博教授指导下取得罗马大学物理学博士学位。他拥有意大利猞猁之眼国家科学院院士、法国科学院外籍院士和美国国家科学院院士等头衔,研究领域为量子场论、

统计力学和复杂系统。由于帕里西在物理学多个领域的重要贡献,2021年获诺贝尔物理学奖之前,他曾获得:1992年玻尔兹曼奖、1999年狄拉克奖章、2002年费米奖、2005年海涅曼数学物理奖、2011年普朗克奖章、2016年昂萨格奖、2021年沃尔夫奖等重要奖项。

帕里西教授在中国改革开放之初就与中国结缘。1980年春访问中国科学院理论物理研究所,与吴咏时教授合作用统计物理思想和方法研究量子场论,理解量子化和量子涨落。他们的合作论文发表在《中国科学》^⑮,在国际粒子物理学界引起了重大反响,被同行称为随机量子化。

2.4 系综本征微观态理论

对于一般性的复杂系统,可能会遇到三个方面的巨大挑战。首先,系统微观动力学难以用哈密顿力学描述;其次,若系统不处在平衡态,其微观态概率分布函数未知;再次,复杂系统序参量一般难以先验确定。

为了应对上述三个方面的挑战,最近我们提出了系综本征微观态理论^{⑯⑰}。既采用了吉布斯的系综概念^⑱,同时借鉴了爱因斯坦的玻色-爱因斯坦凝聚思想^⑲。

经过一段时间对个体数目为 N 系统的观测,我们可获得所有个体在 M 个时刻的状态,从而定义系统的 M 个微观态。利用这些微观态,我们可以构造系统的系综采样,用一个 $N \times M$ 归一化矩阵 A 表示。 A 矩阵的列对应于微观态,行对应于个体状态的时间序列。

利用奇异值分解方法,系综矩阵 A 可分解为^⑳

$$A = \sum_{r=1}^r \sigma_r U_r \otimes V_r, \quad (4)$$

这里 $r = \min(M, N)$, $\sum_{r=1}^r \sigma_r^2 = 1$, U_r 是本征微观态,其概率振幅为 σ_r ,它随时间的演化由 V_r 描述。

本征微观态属于介观层次的状态量,当没有本征微观态起主导作用时,所有概率振幅都非常小。

假如某个概率振幅 σ_i 变成有限,如同玻色气体的玻色-爱因斯坦凝聚,这里出现本征微观态 U_i 凝聚,系统发生相变,序参量为 σ_i 。

尽管本征微观态理论提出的动机是为了研究一般性的复杂系统,但同样适用于传统的物理系统。该理论已成功应用于研究伊辛模型的平衡态相变^{②③},以及一些复杂非平衡系统:全球温度系统^④、大气臭氧空间分布及演化^⑤和群体运动中的非平衡相变^⑥。

3. 复杂地球系统

地球可看作是一个典型的自适应复杂系统^⑦,由大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈和生物圈这五大圈层构成,圈层之间通过物理、化学和生物过程进行相互作用,如图1所展示。

其中,地球气候系统的研究主要有两个方面:1) 实验观测;2) 气候模式(climate models)。由实验观测可获得气候系统的大数据,包括仪器观测

(气象站点、卫星等)数据、再分析数据(ECMWF、NCEP-NCAR 和 JRA 等)以及通过珊瑚记录、树木年轮和冰芯记录等获取的数据。气候模式基于物理、化学及生物过程计算模拟各种气候现象,包含了复杂的动力学过程、热力学过程和物理化学过程的数学模型,基于历史或当前观测数据来模拟和预测气候系统的演化。不仅可用来分析和理解一些气候现象及整个地球气候系统的物理学机制,还可模拟和预测全球气候变化背景下气候系统的演化方向等。气候模式的开发通常依赖于经典物理学、计算数学、计算机和大气动力学的逐步发展和持续积累。真锅淑郎和克劳斯·哈塞尔曼就是因“对地球气候的物理建模、量化可变性和可靠地预测全球变暖”而共同获得2021年诺贝尔物理学奖的一半。

3.1 气候模式简介

随着气候科学及计算机的发展,陆续产生了大量不同类型的气候模式。按照模式依据的物理原理,这些气候模式可分为四大类:分别是能量平衡模

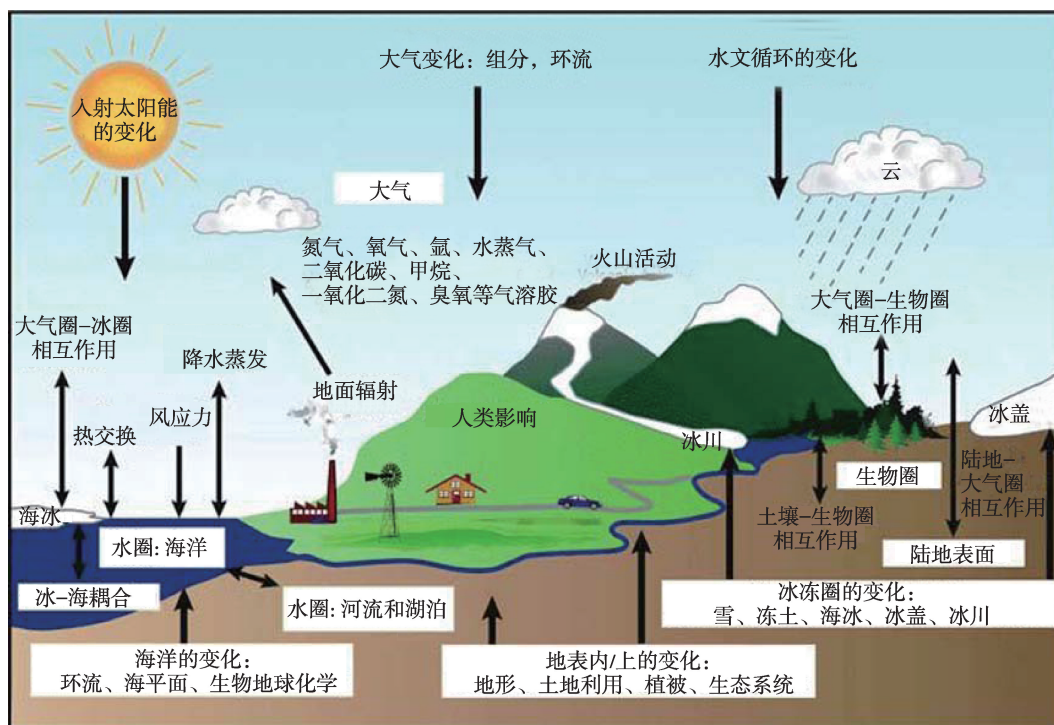


图1 复杂地球系统最基本的组成元素及相互作用(图片来自于IPCC第四次报告^⑧)

式(Energy Balance Model)、辐射对流模式(Radiative Convection Model)、统计动力模式(Statistical Dynamic Model)和大气环流模式(General Circulation Model)。

能量平衡模式又分为零维模式和一维模式。零维模式将地球看作空间的一点,考虑其能量平衡,一维模式对不同纬度带分别地进行研究。辐射对流模式将地球大气简化为一个垂直的大气柱,研究其内部的辐射过程和垂直方向的温度分布。此模式基于二个物理机制:1)在任何高度上,太阳辐射及长波辐射通量与对流热通量保持平衡;2)辐射差异引起的垂直方向温度分布的变化经对流的调整后达到平衡。统计动力模式是统计与动力学方法相结合的一种模式,用统计方法对某些物理过程做参数化,可以用来研究物理因子如二氧化碳、太阳常数等的作用。大气环流模式依据物理定律(牛顿力学、各类守恒定律等)及化学方程构造的流体力学和热力学偏微分方程组,用来模拟大气环流基本性质和预测气候变化。

3.2 真锅淑郎简介

真锅淑郎是美籍日裔科学家,1931年出生于日本,1958年获得东京大学理学博士学位。毕业后到美国地球物理流体动力学实验室(GFDL)工作,目前在普林斯顿大学担任高级气象学家。真锅淑郎毕生致力于研究和开发基于计算机的气候模式,因建立了真锅模型并预测全球变暖而闻名。1967年,真锅淑郎和Wetherald第一次开发出了一维辐射对流模式^⑧。为理解二氧化碳水平增加如何导致气温升高,真锅淑郎把空气团因对流而产生的垂直输送以及水蒸气的潜热纳入其中。使用该模型,他们发现,为了响应大气中二氧化碳浓度的变化,地球表面和对流层的温度随着二氧化碳浓度升高而升高,而平流层的温度则降低。进一步他们发现氧和氮对地表温度的影响可忽略不计,而二氧化碳的影响则很明显:当二氧化碳水平翻倍,全球温度上升超过2摄氏度。根据他们的模拟,二氧化碳若增加一

倍(300 ppm 加至 600 ppm),全球平均温度将上升 2.36 摄氏度^⑨。这一结论为日后的 IPCC 第一次评估报告提供了重要论据。1969 年真锅淑郎和 Bryan 开发了第一个海洋-大气耦合环流模式对气候进行模拟,该模式可以用来研究十年到百年时间尺度的气候的演化^⑩。20 世纪 90 年代,真锅淑郎研究小组使用耦合大气海洋模式来研究气候对大气中温室气体浓度变化的时间依赖性响应。还将该模式应用于研究过去气候变化,包括在古气候记录中揭示北大西洋的淡水注入如何影响气候突变^⑪。

3.3 克劳斯·哈塞尔曼简介

克劳斯·哈塞尔曼是德国海洋学家、气候学家,德国马克斯普朗克气象研究所前所长和汉堡大学名誉教授。1931 年出生于德国汉堡,大约 3 岁时,随家人移民到英国。18 岁高中毕业后回到德国,1955 年在汉堡大学获物理学与数学学士学位,1957 年在哥廷根大学和马克斯普朗克流体动力学研究所获物理学博士学位。1964 年至 1975 年任汉堡大学地球物理研究所所长及理论地球物理学教授。1975 年至 1999 年创立德国马克斯普朗克气象研究所并任所长,期间 1988 年至 1999 年,任德国气候计算中心科学主任。哈塞尔曼的研究兴趣广泛,研究课题包括气候动力学、随机过程、海浪、遥感和综合评估研究。退休之后,他的研究兴趣还转向量子场论等方面。

哈塞尔曼最知名的贡献是开发了气候变率的哈塞尔曼模型^⑫,其中考虑一个具有长记忆力的系统(如海洋)并整合随机强迫因素(如大气),从而将白噪声信号转换为红噪声信号,进一步解释气候系统中无处不在的红噪声信号(例如,涌浪)的发展。

通过随机气候模式,哈塞尔曼还开发出可识别人类对气候系统影响的方法^⑬,分离出了自然噪声和人类活动噪声的影响。例如,太阳辐射、火山爆发或温室气体水平的变化会留下独特的信号和指纹,可被分离出来。这进一步从科学上证实了人为

二氧化碳排放导致了全球变暖的结论。

4. 解读与展望

2021年诺贝尔物理学奖授予复杂物理系统的开创性工作,一半表彰乔治·帕里西“发现了从原子尺度到行星尺度物理系统中的无序和涨落的相互作用”,另一半表彰真锅淑郎和克劳斯·哈塞尔曼“地球气候的物理建模,量化可变性并可靠地预测全球变暖”的研究。瑞典皇家科学院宣布结果以后,不少人对这个结果感觉有些意外。但是,我们了解了相关的科学背景以后,还是会觉得此次的诺贝尔物理学奖实至名归。

回顾诺贝尔物理学奖的历史,以1901年表彰德国物理学家伦琴发现X射线为开端,早期奖励的都是实验发现。1910年才首次授予纯理论的工作:荷兰物理学家范德瓦耳斯的气体 and 液体状态方程。随着理论物理在物理学发展中起到越来越重要的作用,后来更多理论工作获得了奖励,但理论需要得到实验的完全证实。例如,粒子物理希格斯机制在近50年后实验发现了希格斯粒子才被授奖。再往后,对科学发展和人类进步起到非常重要作用的实验手段(云雾室等)和技术(光纤等)也成为被授奖之列。时至今日,与物理学在微观和宇观层次取得的巨大进展相比较,对于宏观层次大量存在的复杂系统,由于系统存在无序、涨落、跨尺度时空耦合等,以及处在不断演化的非平衡状态,人类对于复杂系统的认识非常有限。而当前人类迫切需要探索复杂物理系统、气候系统、社会经济系统等科学规律,以应对来自这些方面的巨大挑战。可以说,今年的诺贝尔物理学奖顺应了科学发展的态势和人类进步的需求,且由于实际复杂系统牵涉多种因素且无法分割,对复杂系统理论的认可也采取了与以前不太一样的标准。

虽然2021年诺贝尔物理学奖已授予复杂物理系统研究成果,但复杂性科学研究总体仍处于初级阶段,方兴未艾。展望未来,从复杂物理系统到大

脑、认知与教育系统、生物系统、社会与经济系统、地球系统等,存在大量重要且引人入胜的科学问题亟待人们去探索和研究,为科学的进一步发展提供了新机遇,研究成果也将推动人类社会的发展与进步。同时,挑战与机遇是并存的。当前学科及领域的划分非常细,形成了许多科学信息交流的壁垒。而复杂系统研究一般涉及多个学科,必须进行跨学科、跨领域的探索和研究,这就对现有的科研范式及教育模式提出了挑战,必须进行变革^①。在各类复杂系统的研究中,复杂地球系统的研究具有比较特别的意义^②。一方面,全球气候变暖给人类社会带来了巨大的挑战,需在行星尺度下研究和理解地球系统的变化规律,从而采取科学的应对方式。另一方面,借助现代科技手段,人类获得了地球系统越来越多的观测数据,已经为挖掘复杂地球系统的科学规律打下了坚实的基础。当前,物理学家已开始比较关注气候系统。美国著名的物理学综述文章期刊 *Reviews of Modern Physics* 最近刊发了4篇气候方面的综述文章^{③-⑤};2021年题为《统计物理方法在复杂地球系统的应用》的综述文章也发表在欧洲著名的物理学综述文章期刊 *Physics Reports* 上^⑥。

物理学的一个重要秉性是致力于寻找不同系统和现象的共性规律,且已取得了巨大的成功,这对复杂系统的研究具有重要的指导意义。未来,复杂系统领域的科学家一定会对各类不同的具体复杂系统进行深入研究,并在此基础之上,注重探索不同系统的共性,致力于挖掘复杂系统背后蕴藏的简单规律。

参考文献

- ① P. W. Anderson, “More is Different - Broken Symmetry and Nature of Hierarchical Structure of Science”, *Science*, 177, 393 (1972).
- ② C. Koch and G. Laurent, “Complexity and the Nervous System”, *Science*, 284, 96 (1999).
- ③ M. J. Jacobson, J.A. Levin, and M. Kapur, *Educational Researcher*, 48, 112 (2019).
- ④ R. Gallagher and T. Appenzeller, “Beyond Reductionism”, *Sci-*

- ence, 48, 112 (1999).
- ⑤ J. W. Gibbs, "Elementary Principles in Statistical Mechanics", Yale University Press (1902).
 - ⑥ A. Einstein, "Kinetische Theorie der Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, Annalen der Physik", 9, 417 (1902).
 - ⑦ A. Einstein, "Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik", Annalen der Physik, 11, 170 (1903).
 - ⑧ A. Einstein, "Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme", Annalen der Physik, 14, 354 (1904).
 - ⑨ L. Navarro, "Gibbs, Einstein and the Foundation of Statistical Mechanics", Arch. Hist. Exact Sci. 53, 147 (1998).
 - ⑩ L. Peliti and R. Rechtman, "Einstein's Approach to Statistical Mechanics: The 1902-04 Papers", J. Stat. Phys. 167, 1020 (2017).
 - ⑪ A. Einstein, "Quantentheorie des einatomigen idealen Gases", Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), Physikalisch-Mathematische Klasse, 261 (1924).
 - ⑫ E. Ising, "Beitrag Zur Theorie des Ferromagnetismus", Z. Physik 31, 253 (1925).
 - ⑬ 汪卫华, "非晶态物质的本质和特性", 物理学进展, 33, 177 (2013).
 - ⑭ S. F. Edwards and P. W. Anderson, "Theory of spin glasses", Journal of Physics F: Metal Physics, 5, 965 (1975).
 - ⑮ M. Mézard, G. Parisi G, and M. A. Virasoro, "Spin glass theory and beyond: An Introduction to the Replica Method and Its Applications", World Scientific Publishing Company, 1987.
 - ⑯ D. Sherrington and S. Kirkpatrick, "Solvable model of a spin-glass", Physical Review Letters, 35, 1792 (1975).
 - ⑰ G. Parisi, "Infinite number of order parameters for spin-glasses", Physical Review Letters, 43, 1754 (1979).
 - ⑱ G. Parisi and Y. S. Wu, "Perturbation theory without gauge fixing". Sci. Sin, 24, 483 (1981).
 - ⑲ G.K. Hu, T. Liu, M.X. Liu, W. Chen, X.S. Chen, "Condensation of eigen microstate in statistical ensemble and phase transition", Sci China Phys Mech, 62, 990511 (2019).
 - ⑳ Y. Sun, Y. Zhang, B. Lu, Z. Lu, J. Fan, X. Li, Q. Deng, X. Chen, "Eigen microstates and their evolutions in complex systems", Commun. Theor. Phys. 73, 065603 (2021).
 - ㉑ X. Chen, N. Ying, D. Chen, Y. Zhang, B. Lu, J. Fan, X. Chen, "Eigen microstates and their evolution of global ozone at different geopotential heights", Chaos, 31, 071102 (2021).
 - ㉒ X. Li, T. Xue, Y. Sun, J. Fan, H. Li, M. Liu, Z. Han, Z. Di, and X. Chen, "Discontinuous and continuous transitions of collective behavior in living systems", Chin. Phys. B 30, 128703 (2021).
 - ㉓ S. Solomon, et al., "Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press (New York, 2007).
 - ㉔ S. Manabe and R. Wetherald, "Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity", Journal of the Atmospheric Sciences, 24, 241 (1967) .
 - ㉕ S. Manabe and R. Wetherald, "The Effects of Doubling the CO₂ Concentration on the climate of a General Circulation Model". Journal of the Atmospheric Sciences, 32, 3 (1975).
 - ㉖ S. Manabe and K. Bryan, "Climate Calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model", Journal of the Atmospheric Sciences, 26, 786 (1969).
 - ㉗ R. Stouffer and S. Manabe, "Response of a Coupled Ocean - Atmosphere Model to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide: Sensitivity to the Rate of Increase", Journal of Climate, 12, 2224 (1999).
 - ㉘ K. Hasselmann, "Stochastic climate models Part I. Theory", Tellus, 28, 473 (1976).
 - ㉙ K. Hasselmann K, "On the Signal-to-Noise Problem in Atmospheric Response Studies. In: Meteorology of Tropical Oceans. Ed. by D.B. Shaw. London: Roy Meteorol Soc., 251 (1979).
 - ㉚ J. Li and W. Huang, "Paradim shift in science with tackling global challenges", National Science Review 6, 1091 (2019).
 - ㉛ W. Steffen et al., "The emergence and evolution of Earth System Science", Natural Reviews Earth & Environment 1, 54 (2020).
 - ㉜ M. Ghil and V. Lucarini, "The physics of climate variability and climate change", Reviews of Modern Physics 92, 035002 (2020).
 - ㉝ M. S. Williamson et al., "Emergent constraints on climate sensitivities", Reviews of Modern Physics 93, 025004 (2021).
 - ㉞ R. Colman and B. J. Soden, "Water vapor and lapse rate feedbacks in the climate system", Reviews of Modern Physics 93, 045002 (2021).
 - ㉟ M. S. Singh and M E. O' Neill, "The climate system and the second law of thermodynamics", Reviews of Modern Physics 94, 015001 (2022).
 - ㊱ J. Fan, J. Meng, J. Ludescher, X. Chen, Y. Ashkenazy, J. Kurths, S. Havlin, H. Schellnhuber, "Statistical physics approaches to the complex Earth system", Physics Reports 896, 1 (2021).