

专 论

# 2021 年诺贝尔物理学奖解读： 复杂物理视角

刘宗华 (华东师范大学物理与电子科学学院 上海 200241)

**摘 要** 2021 年诺贝尔物理学奖颁给了三位科学家: Syukuro Manabe, Klaus Hasselmann 和 Giorgio Parisi, 以表彰他们为我们对复杂物理系统的理解作出的突破性贡献。这是首次颁给了混沌与无序方面的研究方法与成果, 在统计物理与复杂网络研究领域激起了巨大反响。本文从复杂物理的视角进行解读, 希望更多青年学子能加入到这个充满朝气并快速发展的研究领域迎接挑战, 并以中国人的身份做出诺奖级的贡献。

文章编号 1002-0748(2021)12-0002

中图分类号 G633·7

文献标识码 B

**今年的物理学诺贝尔奖:** 北京时间 10 月 5 日 17:45 分, 2021 年的诺贝尔物理学奖评选结果在瑞典首都斯德哥尔摩揭晓——美籍日裔气候学家真锅淑郎(Syukuro Manabe)、德国海洋学家克劳斯·哈塞尔曼(Klaus Hasselmann)以及意大利理论物理学家乔治·帕里西(Giorgio Parisi)因在复杂物理系统研究领域所作出的卓越贡献而被授予 2021 年诺贝尔物理学奖。获奖理由: 对我们理解复杂物理系统的开创性贡献 (for groundbreaking contributions to our understanding of complex physical systems)。他们三人将获得金质奖章、证书, 并分享 1000 万瑞典克朗(按最新汇率, 约合人民币 740 万元)的奖金。真锅淑郎和哈塞尔曼分享其中一半的奖金, 因其建立了关于地球气候的物理模型, 量化了可变性, 并可靠预测了全球变暖情况 (the physical modelling of Earth's climate, quantifying variability and reliably predicting global warming)。帕里西分享另外一半奖金, 因其发现了从原子到行星尺度的物理系统中无序与波动的相互作用 (the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales)。

**统计物理与复杂网络研究领域的反响:** 与往年不同, 今年的诺贝尔物理学奖揭晓后在统计物理与复杂网络研究领域引起了巨大的反响, 人们纷纷在第一时间撰写博客、接受采访、进行解读并网上直播! 这股热闹劲与今年的其他诺贝尔奖也大不相同, 为何?

众所周知, 诺贝尔奖是由瑞典著名化学家、硝化

甘油炸药发明人阿尔弗雷德·伯恩哈德·诺贝尔 (Alfred Bernhard Nobel) 设立的。1895 年 11 月 27 日, 他签署了最后的遗嘱, 用财产中的最大一份设立了一系列奖项, 即诺贝尔奖, 现在包括物理、化学、生理学或医学、文学、和平和经济学六个奖项。迄今为止, 诺贝尔物理学奖共颁发过 115 次, 共 219 人次获得了诺贝尔物理学奖, 实际获奖个人为 218 人, 因为美国物理学家约翰·巴丁 (John Bardeen) 因晶体管效应和超导的 BCS 理论分别在 1956 年与 1972 年两次获得诺贝尔物理学奖。这些物理学诺贝尔奖涵盖了物理学的不同领域, 尤其垂青粒子物理、量子力学与天文学, 但很少颁给统计物理以及基于统计物理而发展起来的一系列新学科, 如旧三论 (系统论、控制论与信息论)、新三论 (普里高津的耗散结构论、哈肯的协同论与托姆的突变论)、混沌动力学及近 20 年来发展起来的复杂网络科学等。如果查看一下所有的诺贝尔奖就会发现, 跟统计物理有关的只有三个, 即 1968 年昂萨格 (Lars Onsager) 的非平衡态热力学的一般关系——倒易关系、1977 年普里高津 (Ilya Prigogine) 的耗散结构论及 1982 年威尔逊 (Kenneth G. Wilson) 的重整化群理论, 但前两者都是化学诺贝尔奖, 因此统计物理方面的诺贝尔奖只有 1 次, 尽管成果颇丰!

由于统计物理及其相关学科的迅速发展, 人们一直期待着诺贝尔奖的认可, 霍金就曾说过“21 世纪是复杂性的世纪”。现在终于开始兑现了, 这就令统计物理与复杂网络研究领域的学者有种扬眉吐气的感觉, 所以惊喜尤甚!

**今年诺贝尔奖的独特特征：**总体来说，今年的物理学诺贝尔奖有三个特征。①年龄特征：真锅淑郎，1931 年生于日本新宫，1957 年获东京大学博士学位，现为普林斯顿大学资深气象学家。哈塞尔曼，1931 生于德国汉堡，1957 年获哥廷根大学博士学位，现为马普气象研究所研究员。帕里西，1948 生于意大利罗马，1970 年获罗马大学博士学位，现为罗马大学教授。这就是说，前两位都是 90 岁高龄才获奖——可见健康长寿是多么的重要！即使是稍微年轻的第三位也是 70 多岁了，难怪在宣布获得诺贝尔奖时，帕里西告诉记者说：“但我知道机会还是有的，所以把电话放在了身边”。②非物理期刊特征：真锅淑郎与哈塞尔曼都是研究气候的。真锅淑郎在 20 世纪 60 年代发展了地球气候物理模型，并首次探索了辐射平衡和气流垂直输运之间的相互作用，为当今气候模型的发展奠定了基础。大约 10 年后，哈塞尔曼创建了一个模型将天气和气候联系起来，从而回答了为什么气候模型是可靠的，尽管天气是多变和混沌的。因此，他们俩的工作可看成是发展气候物理模型的两个阶段。但有趣的是他们俩都没有在物理期刊发表过论文，得的却是物理学诺贝尔奖，也算是一段佳话吧。同时，细心的读者也许会注意到，他们俩的工作等了漫长的 60 年才得到诺贝尔奖的认可，殊为不易。难怪有人发出感慨：做出了漂亮工作后，健康就成为了头等重要的大事！③大跨度特征：帕里西早年的工作是在量子色动力学(QCD)和粒子物理场论方面，著名的贡献有部分子密度的 QCD 演化方程(Altarelli-Parisi 方程)。在统计力学方面，他得到了自旋玻璃 Sherrington-Kirkpatrick 模型的精确解。他和 Kardar, 张翼成提出的 KPZ(Kardar-Parisi-Zhang)方程, 在统计物理、固体物理、偏微分方程等领域均有十分巨大的影响力。因此，他的工作跨度相当大，属于“从原子到行星尺度的物理系统中无序与波动的相互作用”。

**真锅淑郎与哈塞尔曼的贡献：**气候模型来自于天气预报模型的研究。由于天气的混沌性，气候模型无法告诉我们每天的具体天气，但却可以得出各个季节的具体气候，比如平均温度或降雨量等。这方面一个有趣的发现是温室效应，因为它控制着地球的温度，从而决定了各种动植物的命运。我们知道，大气主要由氮气与氧气组成，它们占大气总体积的 99%，但它们并不参与温室效应。真正参与温室效应的是温室气体，它只占大气很小的一部分，温室气体由二氧化碳、甲烷、水蒸气和其他气体组成，它

们会先吸收地球的红外辐射，然后将吸收的能量释放出来，加热周围的空气与地面。这其中二氧化碳只占大气总体积的 0.04%，但它却能左右温室效应，因为二氧化碳越多，温度就越高，空气中就含有更多的水蒸气，从而使温度升高。当二氧化碳浓度增加一倍时，全球气温将上升 2 度以上，这就是为什么现在世界各国都要限制二氧化碳排放量。真锅淑郎于上世纪 60 年代最先证明了大气中二氧化碳浓度的上升将导致地球表面温度升高，并为行星气候系统搭建了初步的数学模型。约十年后，哈塞尔曼在其研究的基础上构建了连接天气和气候的数学模型。真锅淑郎证明了二氧化碳浓度的增加导致全球变暖的原因及其内在机制，而哈塞尔曼则证实了这一现象正在发生。他们俩的模型回答了一个重要问题：在变化莫测的天气中为什么模型依然是可靠的，因为模型是建立在严格的物理学方法上的。

**帕里西的贡献：**统计物理中有个很重要的伊辛模型，即 Ising 模型，形式非常简洁，但却可以揭示许多自然与社会现象背后的相变及其机制如同同步化、选举等，同时还可方便地用于描述临界点附近的重整化变换。Ising 模型包含两种物质类型：铁磁性物质与反铁磁性物质。在铁磁性物质中自旋指向同一个方向，而反铁磁性物质中相邻的自旋指向相反的方向。还有一种物质，其自旋是随机取向的，称为自旋玻璃，是一种无序态。“玻璃”一词正是这种无序性的反映，因为常见的玻璃就是典型的非晶体，没有晶格结构。自旋玻璃可看成是由铁磁与反铁磁键混合而成，致使局部上有些原子很难归于铁磁还是反铁磁，称作受阻挫(frustration)，如图 1 所示。

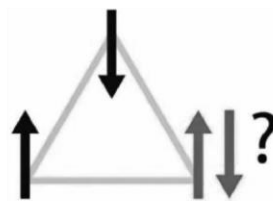


图 1

可见，三自旋不能都反向，总有一对同向，于是系统处于受挫状态。比如你想同时与两人交朋友，但他们彼此憎恨——事情令人受挫！自旋玻璃中的原子间耦合(化学键)由大致上相同数目的铁磁键和反铁磁键混合而成，这种结构带来的结果是，自旋玻璃的稳态构型并不是最低能量构型，因此常常被称为“亚稳态”，如图 2 所示。

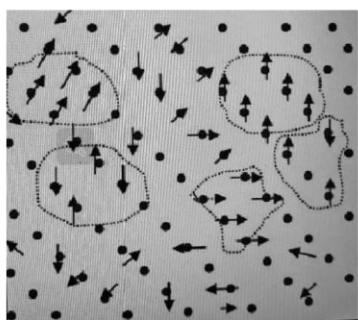


图 2

描述自旋玻璃的模型是 S-K (Sherrington-Kirkpatrick) 模型, 可看成是具有长程相互作用的 Ising 模型, 但其解非常难以求得。在 1979 到 1984 年的一系列工作中, 帕里西引入了复本对称破缺 (replica symmetry breaking) 的概念并将其应用到自旋玻璃模型中, 给出了正确的数学结果, 成为对复杂系统理论最重要的贡献之一。他的发现使得理解和描述许多不同领域 (包括物理学、数学、生物学、神经科学和机器学习等) 完全随机的材料和现象成为可能。

**复杂网络科学的挑战:** 统计物理始于玻尔兹曼与吉布斯, 随后开枝散叶成为发展最快的学科, 先后有老三论与老三论, 然后发展为混沌动力学与近年来的复杂网络科学, 在涉及物理、数学、计算机科学、生物、工程与社会科学等跨学科领域掀起了广泛的革命。目前的挑战主要集中在复杂网络领域, 因为网络无处不在, 即使小到一个圈子, 也是一个网络。那么, 复杂科学思想到底有多重要? 复杂网络科学的开创者之一——Albert-Laszlo Barabasi 在《链接》一书中提出了网络思维的概念, 并将其归纳为 7 把网络思维利剑——第一条定律: 六度分隔; 第二条定律: 无尺度网络; 第三条定律: 马太效应, 富者愈富, 即优先链接原则; 第四条定律: 稳健性和脆弱性; 第五条定律: 中心节点的力量; 第六条定律: 社群

(上接第 7 页)

研究较多, 而对教学技术与教师发展的研究关注度较低。教师的发展直接影响到学生核心素养的培养, 因此应重视教师发展方面的研究, 提升教师群体的素质。同时, 科技飞速发展, 基于物理学科核心素养的课堂教学也应与科技相结合, 重视教学技术的研究。

#### 参考文献

[1] 郭玉英. 从三维课程目标到物理核心素养[J]. 物理教学, 2017

的力量; 第七条定律: 网络控制。根据这些网络思维, Barabasi 指出: “当你找工作的时候, 一般是通过弱连接的人, 因为通过强连接的人你找不出新信息, 但通过弱连接者你可以得到没有的新信息, 获取其他圈子”。其实, 找对象又何尝不是如此? 此外, 大公司商业模式从根本上来讲, 就是网络式商业模式。

复杂网络科学的另一个挑战是理解认知与记忆等脑功能的物理机制。一直以来, 大脑都被认为是最大的黑箱, 我们只知道它的输入与输出, 而不知道它内部究竟是如何操作的。为此, 2013 年美国与欧盟率先提出了脑计划, 紧接着 2014 年与 2015 年日本与中国分别提出了自己的脑计划。现在越来越多的国家正逐步投入巨资来开发大脑, 我们中国也不例外, 因为这不仅仅是个科学问题, 还关系到巨大的经济市场。研究大脑不仅有利于人工智能的开发, 更重要的是在医疗方面的应用, 造福人类。

**中国学者大有可为:** 最后, 一个不争的事实是, 在物理学诺贝尔奖的这片天空中, 虽有华人科学家屡屡获奖, 但大陆学者本土的工作还未实现零的突破。然而, 也无需太过沮丧, 因为从改革开放后中国科技的快速发展来看, 这一天已越来越近了。随着国家逐年加大科研经费投入, 我国的创新成果已呈现出井喷式的增长, 特别是在统计物理与复杂网络科学领域。借此机会, 希望更多青年学子能加入到这个充满朝气并快速发展的研究领域来迎接挑战, 并以中国人的身份做出诺贝尔奖级的贡献。期待这一天的早日到来!

致谢: 本文参考和引用了网络上的部分博客、采访及解读资料, 在此一并致谢!

#### 参考文献

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/press-release/>  
(11): 2—4, 8.
- [2] 胡定荣, 徐昌. 改革开放 30 年中国教学论的进展——基于教学目标研究的内容分析[J]. 上海教育科研, 2010(2): 16—20.
- [3] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017 年版)[S]. 北京: 人民教育出版社, 2018. 1.
- [4] 张静, 郭玉英. 国外大学物理教育研究的现状和发展动向——基于 AJP、PRST 中大学物理教育研究论文(2001—2011)的内容分析[J]. 大学物理, 2013(4): 41—45.