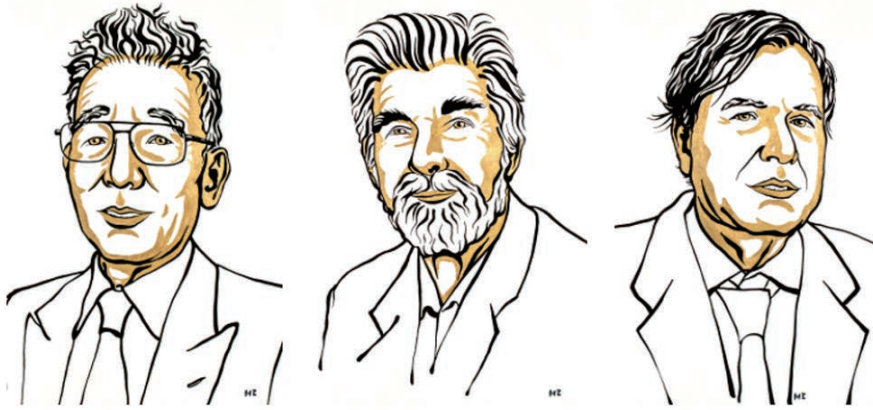


物理学奖：复杂物理系统

撰文/胡永云（北京大学物理学院）、金瑜亮（中国科学院理论物理研究所）



获得2021年度诺贝尔物理学奖的美籍日裔大气物理学家真锅淑郎（左）、德国物理学家克劳斯·哈塞尔曼（中）和意大利物理学家乔治·帕里西（右）

2021年度诺贝尔物理学奖授予了3位科学家，以表彰他们“对我们理解复杂物理系统的开创性贡献”。美籍日裔大气物理学家真锅淑郎（Syukuro Manabe）、德国物理学家克劳斯·哈塞尔曼（Klaus Hasselmann），每人分享1/4的奖金，以表彰他们“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”的贡献；另外1/2的奖金授予意大利物理学家乔治·帕里西（Giorgio Parisi），以表彰他“发现了从原子到行星尺度的物理系统中无序和涨落之间的相互影响”。

本届评奖中，诺贝尔物理学奖委员会巧妙地把地球气候系统变化问题与理论物理问题“统一”起来，凸显了对基于物理理论解决复杂现实世界问题，尤其是地球宜居气候演化问题的高度重视。同时，也让人们认识到，“人类活动导致全球变暖”的共识具有坚实的物理理论基础。

“全球变暖”有理论支撑

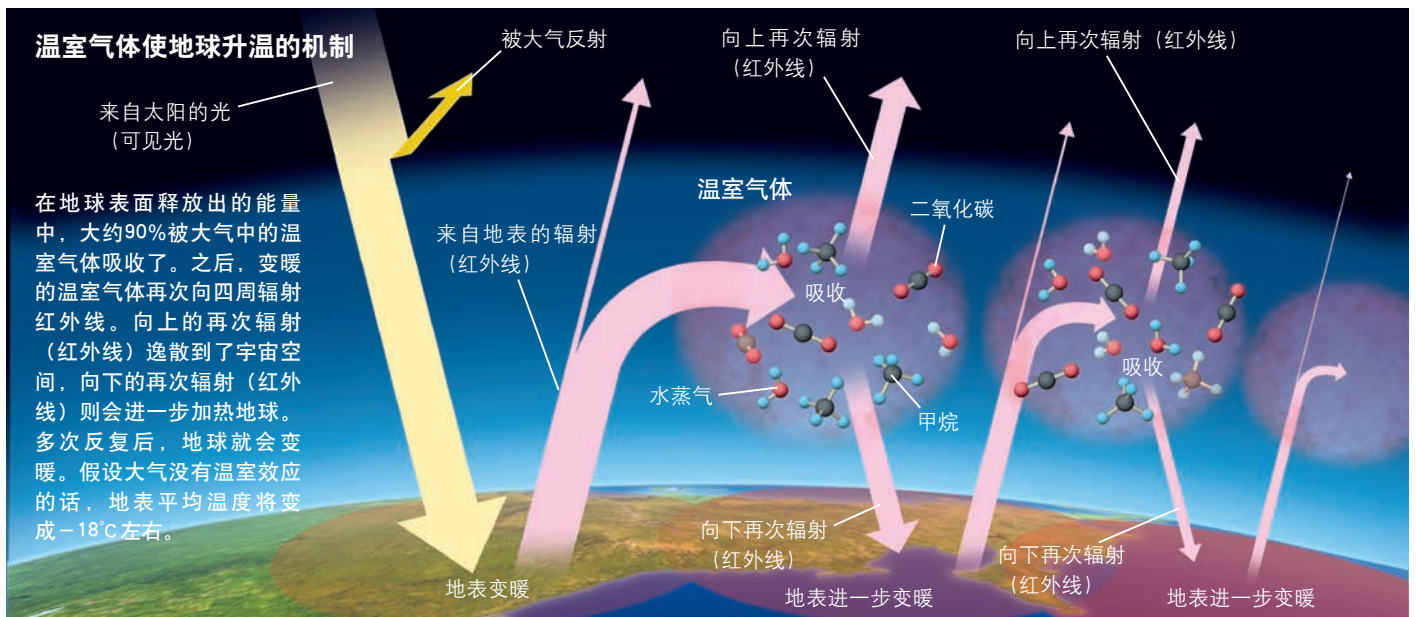
我们已经知道，以二氧化碳为代表的温室气体是造成地球升温的原因。可是，大气中的成分很复杂，而且天气瞬息万变，当初是如何得知其成因的呢？

关于全球变暖的科学历史，一般认为法国数学家傅里叶（1768~1830）是最早研究这个问题的人。1827年，傅里叶第一个提出地球大气具有温室效应。地球表面温度一方面取决于日地距离，另外很大一方面应该是因为地球表面有大气层。如果不考虑大气层，理论计算地表温度为 -18°C ，而实际观测的全球温度是 15°C ，意味着大气层把地表温度升高了 33°C ，这就是大气的温室效应。如果没有大气层，地球也不会是一颗宜居的星球。

1861年，化学家丁铎尔（John Tyndall, 1820~1893）发现并不是所有的大气成分都能导致温室效应，只有三原子分子： CO_2 、 H_2O 、 N_2O 、 O_3 ，以及 CH_4 才可以，大气中含量最多的 O_2 、 N_2 不会导致温室效应。

1896年，阿伦尼乌斯（Svante August Arrhenius, 1859~1927）设计了一个单层大气模式，定量地计算了 CO_2 的温室效应。他的重要结论是： CO_2 浓度加倍的话，可以导致全球平均温度增温 6°C 。人类使用化学燃料将导致全球变暖。但他认为，温和的气候环境对日益增长的全球人口而言，是一件好事。

单层大气模式还是很简单，不能用来预测气候变化。后来，卡尔·史瓦西



(Karl Schwarzschild, 1873~1916) 以及钱德拉塞卡 (Chandrasekhar S., 1910~1995) 的辐射理论对后面的计算起了很大的推动作用。

20世纪初, 量子力学的建立帮助我们理解气体分子的吸收谱, 气体分子吸收谱的测量为精确计算辐射传输奠定了基础。计算机的发展为快速计算辐射传输和气候模式的发展提供了可能。

但真正可以量化气候变化以及可靠地预测气候变暖的数值模式, 还要等到真锅淑郎的工作。他提出的辐射对流模式 (Radiative-convective model), 为地球大气提供了很好的模型。

两位获奖人的重要贡献

真锅淑郎年轻时在日本接受的基础教育, 博士毕业后到美国发展。20世纪60年代, 他领导了地球大气物理模型的开发, 是第一个探索辐射平衡和气团垂直输送相互作用的人。真锅淑郎非常勤奋, 他的工作为建立气候模型奠定了基础。这些气候模式成为政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 评估气候变化和未来气候预估的重要工具。

哈塞尔曼的重要贡献在于, 建立了一个将天气和气候联系在一起的模型, 很好地解释了在高频天气信号背景下, 气候模型依然可靠的原因。气候模式在噪声的影响下, 是不是可靠呢? 他创造性地构建了“时-空指纹法” (Spatio-temporal fingerprint), 识别出自然现象和人类活动在气候中分别留下的“指纹”信号, 并以此证明了全球变暖是由于人类排放二氧化碳造成的。

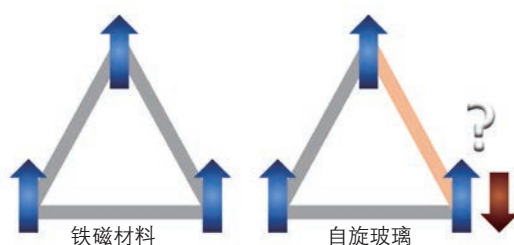
哈塞尔曼此前在多个研究机构供职, 退休前任德国马普气象研究所所长, 但为人很低调。若不是这次获诺奖, 很多人都不会了解他的学术成就。在2006年的一次采访中, 他表示, 自己一生都没有遇到好导师, 自己指导学生也一般, 还曾经被所在单位辞退过。他的研究方向从物理、海洋、气候变化一路走来, 完全是出于对人类社会生存环境的关心和兴趣使然。

前两位获奖者所做的研究, 因为平时大家对全球变暖的话题都有所耳闻, 还比较熟悉。第三位获奖者所从事的理论物理研究, 大家就比较陌生了。乔治·帕里西 (Giorgio Parisi) 因其在“无序材料和随机过程理论中的革命性贡献”而获奖, 并获得一半奖金, 可见分量之重要。那么, 什么是无序材料呢?

物质常见的相态包括气相、液相和固相。微观上, 气体由大量的气体分子组成, 而且这些气体分子的运动是随机无规则的。如果降低温度, 那么气体会凝结成液态 (如水蒸气凝结成水滴)。随着温度进一步降低, 液体会凝固成固态 (如水结冰)。在通常情况下, 这种过程形成的固体为晶体。与气体不同, 晶体中粒子的排列具有周期性, 形成规则有序的晶格结构。对于某些液体来说, 如果降温的速率足够快, 那么最终形成的固体为玻璃, 而非晶体。玻璃粒子的排列没有明显的规则, 并且每次降温过程会形成不同的结构。由于这类材料的无序性体现在粒子的排列结构中, 因此也被称为“结构玻璃”。

除了结构玻璃之外, 另一种典型的无序材料是随机掺杂的合金, 即自旋玻璃。在这类材料中, 每一个原子可以等效地视为一个自旋 (小磁针), 且每个自旋只有向上或者向下两种可能的指向。在普通的铁磁材料中, 所有的自旋指向一致。然而在自旋玻璃中, 由于自旋之间相互作用不一致, 导致无法实现所有自旋指向同一方向。这种效应被称为“阻挫” (下图)。

自旋玻璃中的阻挫



每个自旋由箭头表示, 有向上或向下两种取向。自旋之间的连边表示它们之间的相互作用 (或者理解为需要满足的条件)。如果两个自旋之间的连边为灰色, 表示这两个自旋希望指向同一方向, 否则这两个自旋希望指向相反方向。在自旋玻璃中, 无法找到一种自旋指向的构型, 使得所有的约束条件都满足——这就是“阻挫”。

统计力学: 从无序中寻找规律

19世纪, 麦克斯韦、玻尔兹曼、吉布斯等人建立了统计力学。作为现代物理的支柱之一, 统计力学为物理体系的宏观性质提供了微观解释。例如, 统计力学表明, 宏观上测量得到的气体的温度对应了微观上气体粒子的平均动能。由于阻挫的存在, 物理学家在把统计力学应用到玻璃体系时遇到了巨大的数学上的困难。20世纪70年代, 很多著名的物理学家都致力于寻找解决这个问题的方案, 其中不乏像菲利普·安德森 (Philip Anderson) 和戴维·索利斯 (David Thouless) 这样的诺奖得主。

1979年, 帕里西在自旋玻璃理论上获得了重大突破。他的推导中用到了“复本技巧”, 即把同一个系统做多个复本之后, 再统一地用统计力学的方法处理。帕里西意识到, 在自旋玻璃态中, 这些复本以一种极其复杂而又优美的方式组织起来。这种组织方式在数学上称为超度量性或分形, 而形成这种组织方式的过程对应了自旋玻璃的复本对称性破缺。

帕里西理论带来的影响

帕里西提出的自旋玻璃模型的解, 几十年后被数学家严格地证明。他的理论目前被广泛地应用在无序体系以及随机问题中, 包括玻璃化转变、颗粒物质的阻塞相变、数学中的优化问题以及机器学习中的神经网络模型等。自旋玻璃模型中的复本对称性破缺也在其他无序体系 (如胶体和随机激光等) 的实验中观测到。正如诺贝尔物理学奖评委会所说, 帕里西的工作证明了“如果不正确地考虑无序、噪声以及可变性, 那么决定论将只是一种幻像”。^[N]

(责任编辑/闫凯)