



解读2021年诺贝尔物理学奖：浅谈Klaus Hasselmann的科学贡献

宋丰飞^{1,2}, 吴立新^{1,2*}

1. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心/物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266003;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋动力过程与气候功能实验室, 青岛 266237

* 联系人, E-mail: lxwu@ouc.edu.cn

2021年诺贝尔物理学奖授予了对理解复杂物理系统作出突出贡献的三位科学家, 其中包括两位气象学家, 分别是德国马克斯普朗克气象研究所的Klaus Hasselmann和美国普林斯顿大学的Syukuro Manabe^[1]. 主要是为了表彰他们对模拟地球气候、定量气候变率和准确预测全球变暖而做出的突出贡献. 这是气象学家历史上首次获得诺贝尔物理学奖, 也是自1995年气象学家因臭氧空洞的发现而获得诺贝尔化学奖之后, 时隔26年再次斩获诺贝尔科学类奖项. 鉴于此次获奖对于气象人的巨大鼓舞, 本文对Klaus Hasselmann的科学贡献进行了一些简要解读并就对我们科研工作的启示谈一些个人的看法. 关于Manabe的学术贡献可参见胡永云教授的解读^[2].

1 Klaus Hasselmann的科学贡献

Klaus Hasselmann的科学兴趣广泛, 涉及领域众多, 从早期的大气湍流到海洋波动研究, 再到后面的气候变化研究, 都留下了许多非常精彩的工作. 此次诺贝尔物理学奖主要是奖励他的两项与气候变化相关的研究: 一是发展和应用了一个随机气候模型; 二是发展和应用了检测和归因气候变化的最优指纹法. 本文首先介绍这两项代表性工作, 最后简单介绍了他的其他突出工作.

众所周知, 包含大气、海洋、陆面和冰雪的地球气候是一个多尺度系统, 小到湍流、大气对流, 再到中纬度天气系统, 罗斯贝波和遥相关型以及大到大气海洋耦合导致的年际和年代际变率模态, 如厄尔尼诺-南方涛动和太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)等. 不同的气候现象发生在不同的时间和空间尺度上. 一般而言, 越短的时间尺度也往往对应着越小的空间尺度, 反之亦然. 比如, 湍流往往发生在厘米和米级、仅持续数秒到数分钟, 而大气罗斯贝波往往可以达到行星尺度, 并持续数周到数月. 正是由于气候系统的多尺度特性, 想要利用气候模型完整描述所有物理过程非常耗时耗力, 以当前的计算能力都不现实, 更不要说在20世纪60~70年代. 这正是Klaus Hasselmann发展随机气候模型的



宋丰飞 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心/物理海洋教育部重点实验室教授. 2010年毕业于中山大学, 获学士学位; 2015年毕业于中国科学院大气物理研究所, 获气象学博士学位; 2015~2017年在美国加州大学圣地亚哥分校做博士后, 2017~2021年在美国西北太平洋国家实验室历任博士后和研究员. 2021年11月正式加入中国海洋大学. 主要研究方向是季风、热带耦合带和中尺度对流系统以及对全球变暖的响应.



吴立新 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心/物理海洋教育部重点实验室教授, 中国科学院院士. 1988年毕业于清华大学, 获学士学位; 1994年毕业于北京大学, 获博士学位; 1994~1995年于美国新泽西罗格斯大学做博士后. 1995~2005年在美国威斯康星大学麦迪逊分校工作, 2005年至今在中国海洋大学工作. 主要研究方向是大洋环流与气候变化.

时代背景. 为了解决这个问题, 在最初建立的随机气候模型^[3]中, 他充分利用不同物理过程在时空尺度上可以分离的特征, 将大气状态变量表示成缓慢的气候分量和快速的天气扰动, 进而得到了只包含缓慢气候分量的有效方程. 在这个奥恩斯坦-乌伦贝格方程中, 他将不能分辨的天气扰动表示成“随机噪音”项. 这样, 就克服了快速且随机的天气变化给气候模型带来的巨大计算挑战, 成功地建立了天气和气候之间的联系. 这个模型的灵感来源于Klaus Hasselmann的强大物理学背景. 在物理学中, 爱因斯坦发展了著名的布朗运动理论. Klaus

Hasselmann将气候变化和天气扰动类比为经典布朗运动中的信号和噪音关系。应用布朗运动概念,他使用随机偏微分方程来研究气候问题。通过这个模型,他还发现了快速的大气变化能够导致缓慢的海洋变化。随机气候模型的应用让我们深刻认识到气候变化是实实在在发生的。但如今,越来越多的研究开始关注全球变暖对极端天气事件的影响。在这种情况下,天气过程就需要在气候模型中显式表达。很显然,随机气候模型并不适用于这类研究。因此,针对不同的问题设计不同的气候模型是每个时代的气候学者不可避免的问题。

当气候模型已经具备,我们就可以拿其来研究气候变率和变化。在20世纪80年代,一个很重要的问题就是当前的气候变化是气候系统内部变率还是自然强迫,抑或是人类活动导致?为了回答这个问题,当然可以通过在气候模式中控制单独自然强迫和单独人为强迫来定性回答这个问题。但是由于试验样本不足和模式误差的存在,很难定量给出它们的相对贡献。为了解决这一问题,Klaus Hasselmann创新性地利用气候模式和观测数据,建立了一套检测和归因气候变化的统计框架^[4-6]。他认为如果人类活动导致了当前的气候变化,这应当是全局性的,即在世界的各个角落都可能留下特殊的“指纹”。所以,应该可以通过检测这种“指纹”来寻找人类活动改变气候的证据。数学上,我们可以将这个统计框架写成标准的回归方程模型 $y=ax+b$,其中 y 是观测, x 是气候模式中对人类活动强迫的响应, b 代表气候系统的内部变率,可以从气候模式的工业革命前实验中获得。通过 x 、 y 和 b ,我们就可以得到 a 。 a 可以指示人类活动的影响是否可以在观测数据中得到检测。如果 a 显著地不等于0,则意味着人类活动的影响可以在观测中检测到。如果 a 接近于1,则意味着观测中的气候变化信号几乎全由人类活动导致。如果 a 大于(小于)1,则意味着模式高估(低估)了观测中的气候变化信号^[7-9]。我们可以看到, a 将模式对外强迫的响应朝着观测进行了订正,而 b 则系统考虑了气候系统中的自然变率,这是这套统计框架定量描述的地方。正是基于这套统计框架和最新发展的气候模式,第六次联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布的报告才得出结论:“毋庸置疑的是,人类活动已经引起了大气、海洋和陆地的变暖。”^[10]

当然,以今天的视角去审视这套检测归因的统计框架,会发现其也有一定的局限性。第一,这套框架假定外强迫和内部变率对气候系统的影响是线性叠加的;第二,其假定模式对气候系统内部变率的响应是可以真实再现的。这两个假设都存在一定的问题。首先,外强迫会影响气候系统的内部变率,即工业革命前和高排放情景下的内部变率可能并不相同。比如,在温室气体和气溶胶强迫作用下,一种主要的内部变率模式-PDO的正位相更容易出现^[11]。最近也有研究指出在全球变暖下,PDO的振幅减弱,周期变短,预报难度也会增大^[12]。因此,外强迫和内部变率线性分离造成的偏差需要定

量估计。另外,针对气候系统模式能否真实再现气候系统内部变率,最近的两篇综述文章都指出模式对气候系统两大主要内部变率模式——PDO和大西洋年代际振荡(AMO)——的模拟均存在很大偏差^[13,14]。因此,利用气候模式去描述真实自然界中的内部变率所导致的偏差需要定量估计,将是未来值得研究的课题。

除了上述两个获奖工作,Klaus Hasselmann早期在海洋波动研究方面也做了很多杰出的工作。在这个领域,他从理论上解决的第一个问题是海洋波动的非线性耦合^[15]。这个问题一直是海洋波动研究的核心问题,曾困扰海洋学界很长时间。这项工作的取得与他以前对湍流的研究密不可分。除此之外,基于根本的物理学框架,他还创新性地定量给出了海表波动谱^[16,17]。这项研究也让他对海表扰动的本质有了深入的理解,这对他随后发展随机气候模型起到了重要推动作用。

2 对我们工作的启发

Klaus Hasselmann的获奖对我们科研工作的启发有如下三方面。首先,如前所述,Klaus Hasselmann的研究领域非常广泛,也有很广很深的知识储备。这样,他会将一个领域里的成熟方法应用到另一个领域来解决新的问题。比如,他建立随机气候模型的灵感正是源于爱因斯坦的布朗运动概念和他早期对湍流运动的研究,而他建立检测和归因统计框架得益于他强大的数学知识储备。其二,人的精力有限,应当集中精力做自己有兴趣同时有能力做好的研究。我们现在往往只强调做自己感兴趣的研究,但如果能力不具备或者时机不成熟,也往往是浪费时间。Klaus Hasselmann早年立志解决湍流问题,但正如他在Hans Von Storch的采访中所说^[18],除了对后面建立随机气候模型有所启发外,他在湍流方面并无大的建树,所以他后来更集中精力做海洋波动和气候变化方面的研究,这才有后来导致他获奖的两项重要工作的诞生。其三,气候系统的奥秘是无穷的,所以气候学的研究也是无止境的。研究新的问题需要发展能解决这个问题的新方法,但每个问题的难易程度和迫切程度都不一样。如前所述,为了回答他那个时代最迫切需要回答的问题,Klaus Hasselmann发展了随机气候模型并建立了最优指纹法。而在我们这个时代,急切需要回答的问题是气候变化会对我们的日常天气产生什么样的影响以及如何才能减缓全球变暖。对于前一个问题,气候学家们已经着手建立天气-气候无缝隙模式,这必将是未来气候模式发展的一个潮流,我国需要在这方面迎头赶上。而对于后一个问题,即便是在科学层面上,仅仅依靠气候学家也很难解决。针对这一问题,我国需要迫切回答的是如何才能做到“碳达峰、碳中和”。这要求当代气候学家们向Klaus Hasselmann等先辈们学习,扩充知识领域并与不同领域的专家学者广泛交流并集中精力发挥自己的专长,为解决人类面临的巨大生存压力而共同努力。

推荐阅读文献

- 1 The Nobel Committee for Physics. Scientific background on the Nobel Prize in Physics 2021: “for groundbreaking contributions to our understanding of complex physical systems”. 2021
- 2 Hu Y Y. From global warming to complex physical systems: Reading of the 2021 Nobel Prize in Physics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 548–556 [胡永云. 从全球变暖到复杂物理系统——2021年诺贝尔物理学奖解读. *科学通报*, 2022, 67: 548–556]
- 3 Hasselmann K. Stochastic climate models part I. Theory. *Tellus*, 1976, 28: 473–485
- 4 Hasselmann K. On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies. In: Shaw D B, ed. *Meteorology of Tropical Oceans*. London: Roy Meteorol Soc, 1979. 251–259
- 5 Hasselmann K. Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change. *J Clim*, 1993, 6: 1957–1971
- 6 Hasselmann K. Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Clim Dyn*, 1997, 13: 601–611
- 7 Hegerl G, Hoegh-Guldberg O, Casassa G, et al. Good practice guidance paper on detection and attribution related to anthropogenic climate change. In: Stocker T F, Field C B, Qin D, et al., eds. *Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Detection and Attribution of Anthropogenic Climate Change*. IPCC Working Group I Technical Support Unit. Bern: University of Bern, 2010. 8
- 8 Sun Y, Zhang X, Zwiers F W, et al. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. *Nat Clim Change*, 2014, 4: 1082–1085
- 9 Zhou T J, Zhang W X, Zhang L X, et al. The dynamic and thermodynamic processes dominating the reduction of global land monsoon precipitation driven by anthropogenic aerosols emission (in Chinese). *Sci Sin-Terrae*, 2020, 50: 1122–1137 [周天军, 张文霞, 张丽霞, 等. 人为气溶胶导致全球陆地季风区降水减少的动力和热力过程. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50: 1122–1137]
- 10 IPCC. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. In: MassonDelmotte V, Zhai P, Pirani A, et al., eds. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- 11 Dong L, Zhou T, Chen X. Changes of Pacific decadal variability in the twentieth century driven by internal variability, greenhouse gases, and aerosols. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 8570–8577
- 12 Li S, Wu L, Yang Y, et al. The Pacific Decadal Oscillation less predictable under greenhouse warming. *Nat Clim Change*, 2020, 10: 30–34
- 13 Newman M, Alexander M A, Ault T R, et al. The Pacific decadal oscillation, revisited. *J Clim*, 2016, 29: 4399–4427
- 14 Zhang R, Sutton R, Danabasoglu G, et al. A review of the role of the Atlantic Meridional Overturning Circulation in Atlantic Multidecadal Variability and associated climate impacts. *Rev Geophys*, 2019, 57: 316–375
- 15 Hasselmann K. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part 1. General theory. *J Fluid Mech*, 1962, 12: 481–500
- 16 Hasselmann K. Feynman diagrams and interaction rules of wave-wave scattering processes. *Rev Geophys*, 1966, 4: 1–32
- 17 Hasselmann K. Nonlinear interactions treated by the methods of theoretical physics (with application to the generation of waves by wind). *Proc R Soc Lond A*, 1967, 299: 77–103
- 18 von Storch H, Olbers D. Interview with Klaus Hasselmann, GKSS Report 2007/5. 2007. 67

Summary for “解读2021年诺贝尔物理学奖: 浅谈Klaus Hasselmann的科学贡献”

The 2021 Nobel Prize in Physics: Discussion on the contributions of Klaus Hasselmann

Fengfei Song^{1,2} & Lixin Wu^{1,2*}

¹ *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System/Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003, China*

² *Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*

* Corresponding author, E-mail: lxwu@ouc.edu.cn

Klaus Hasselmann, a German meteorologist and founding Director at the Max Planck Institute for Meteorology, received the Nobel Prize in Physics 2021 together with Syukuro Manabe (USA) and Giorgio Parisi (Italy). He was rewarded mainly because of his two important climate researches, i.e., establishing a stochastic climate model and developing a detection & attribution framework for the climate change. In this study, the backgrounds, scientific significance and limitations of these two researches are discussed. During the 1960s–1980s, the most important question in climate research was whether global warming had already occurred. To answer this question, the climate model considering both deterministic climate process and chaotic weather processes was first established by Klaus Hasselmann. In this climate model, the weather and climate processes were described as a rapidly changing noise and slowly evolving signal, respectively. This way, we can make climate models reliable in the future despite the noisy weather. Although the stochastic climate model has been widely used in the climate community, it has some limitations. As the weathering process was parameterized in the stochastic climate model, it cannot be used to investigate the weather changes under global warming, which is an important question in the current day. To compare global warming in the model and observation, he developed a statistical detection and attribution framework, in which both the response to the external forcing and internal variability of the climate system can be estimated from the model. Further, he connected the climate model to the observation by developing a statistical framework, which was used to detect and attribute the climate change in the observation successfully. However, there are also some limitations in this framework. It assumes (1) the response to the external forcing and internal variability can be linearly separated; (2) the model can faithfully represent the response to the external forcing and internal variability of the climate system in nature. Both assumptions may not always hold and should be examined carefully in the future. Besides these two important climate researches, the significance of the other two important works about the ocean waves is briefly introduced. Last, we discuss what we can learn from Klaus Hasselmann in terms of his scientific contributions. The most important thing is that we should focus on the most urgent questions in our days, e.g., how the weather will change under global warming and how to mitigate global warming, by developing new methods and tools.

climate model, climate change, Nobel prize in physics, ocean wave

doi: [10.1360/TB-2021-1211](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1211)