

复杂性与涌现

没有一只鸟在发号施令，没有一只鸟能俯瞰全局，整群鸟却齐刷刷地转向。

黄昏时分，罗马上空几千只椋鸟倾泻而出，开始「呼吸」：收拢、分裂、拧紧成一只黑暗的拳头，再舒展成一条飘带。整个过程寂静得诡异，没有一次碰撞。看起来像编排好的舞蹈，坦率地说，像有什么东西在指挥。几个世纪以来，最流行的解释不外乎两种：有只头鸟，或者鸟类之间存在某种心灵感应。真相却更奇怪、也更深刻——根本没有指挥者。每只鸟只盯着身边少数几个邻居，遵守几条局部规则。那个会呼吸的形状，不存在于任何一只鸟的脑袋里。它是涌现的：一种只活在整体层面的模式。

这种「零件简单，模式精妙」之间的落差，就是今天要深入的主题。它是科学中最深刻、也最未定论的观念之一，背后藏着一个问题，将在后续课程里一直尾随我们：当更高层次出现某种新事物时，它究竟是真正的新，还是只是隔着距离看到的旧物理学？

我们身在何处

这一部分为模块一的认识论工具箱收尾，也给我们从课程伊始就若隐若现的那条线命了名。「涌现」在第 1 日已轻触过——在那里，「知道」本身已是一种系统层面的性质。今天它才得到正式定义。我们将大量调用第 7 日，因为今日最大的争议关乎：某个光鲜亮丽的新复杂度指标，是否只是穿了白大褂的压缩。我们还会复用第 5 日，因为涌现最难的版本正是关于下行因果的命题：整体反过来推动它的组成部分。

现象

六个或七个邻居，仅此而已

先从我们真正知道的东西说起——用第 1 日那种审慎的意义。2000 年代中期，STARFLAG 项目在罗马一座博物馆楼顶架上立体摄影机，拍摄真实椋鸟群，最多达 2700 只，并重建了每一只鸟的三维位置。然后他们问了一个看似简单的问题：当一只鸟根据邻居调整自己时，它参考的是哪些邻居？

直觉答案是「度量式」的：鸟对周围三米内所有鸟作出反应。数据说不。鸟类追踪的是固定数目的邻居：六到七只，无论这些邻居离它近还是远。鸟群挤紧时，每只鸟仍看同样的六七只；鸟群散开时，仍看同样的六七只，只是它们更远了。这种互动是拓扑式的，而非度量式的：它数的是邻居，不是米数。

「平均而言，每只鸟与固定数量的邻居（六到七只）互动，而不是与固定度量距离内的所有邻居互动。」Ballerini 等, PNAS, 2008。

这为什么重要？因为如果你希望在受攻击时维持群体不散，拓扑规则正是你想要的。当一只隼刺入鸟群、局部密度暴增时，一只按固定半径反应的鸟会突然要追踪几十只邻居，从而应接不暇。一只「盯住最近的七个」的鸟，无论密度如何扭曲都能保持凝聚。这条规则很鲁棒，而且纯粹局部。没有鸟知道鸟群的形状，没有鸟在求解全局模式。模式只是成千上万只鸟各自照看一小块邻域的副作用。

印刷版模型

这个交互面板可调节三条局部规则。全部关闭时，运动像气体；打开分离、对齐与凝聚后，秩序会以高对齐分数的形式出现。

规则	局部指令	系统效应
分离	当邻居太近时避开。	防止碰撞，保持个体独立。
对齐	与附近鸟的平均航向保持一致。	让群体整齐划一地转向。
凝聚	漂向局部质心。	防止鸟群消散。
最近邻数量	追踪约六到七个邻居，而非某个半径。	在密度变化时保持凝聚。

模型

1986 年写下的三条规则

这个模拟本质上就是 *Boids*，由 Craig Reynolds 在 1986 年构建、1987 年于 SIGGRAPH 发表。Reynolds 想为动画制作逼真的群集，结果发现只需要三条局部规则：分离（别挤）、对齐（随邻居转向）、凝聚（留在群里）。仅凭这三条，群集的全套动作就自然涌现：盘旋、绕开障碍、再流畅地汇合。*Boids* 此后曾驱动电影里的蝙蝠群和无数数字大军。它是经典示范：复杂的整体行为未必需要复杂的整体原因。

Boids 只是同一把戏的一个标本：简单的零件，惊人的整体。

- 蚁群在没有测量员、没有地图的情况下找到通往食物的短路径。每只蚂蚁留下化学踪迹并跟随其他蚂蚁的踪迹；越短的路线被强化得越快。生物学家称之为痕迹协调：通过留在环境中的痕迹来协调，而非直接发号施令。
- 一锅水能自行组织起来。从底部加热，超过某个阈值后，平静的液体分裂为有序的对流胞：由能量流维持的结构，这也是第 83–85 日生命物理弧线的预告。
- 你的大脑正在阅读这个句子，但颅内并没有一个小人在阅读。意义从单个什么都不「懂」的神经元中涌现出来，这个难题更陡峭的版本我们将在第 123–126 日再回头看。

当零件开始计算

黏菌那令人抓狂的案例

如果说椋鸟群是涌现之美，那黏菌就是没有大脑却涌现出的智慧。多头绒泡菌 (*Physarum polycephalum*) 是一个巨大的单细胞，一摊流淌着原生质的黄色团块，酷爱燕麦片。

2010 年，中垣俊之 (Toshiyuki Nakagaki) 与寺尾厚 (Atsushi Tero) 领导的团队把燕麦片摆成东京与周边 35 个城镇的地理形状，然后把黏菌放在「东京」上。这团黏菌向外蔓延，吞没食物，再自我修剪：冗余的管道枯萎，高效的管道变粗。大约一天内，它雕塑出的网络在总长度、效率与容错性上都与真实的东京铁路系统颇为相似。

该模型「以定量方式模仿了那些仅凭语言描述既无法捕捉、也无法量化的现象」。Wolfgang Marwan, 《科学》观点文章, 2010 年。

黏菌并不聪明。它只运行一条简单的局部规则：原生质流动好的管道就加固，其余则放弃。当这条规则在每一处同时执行，它就计算出一个接近最优的网络。这个菌落解决了一只蚂蚁无法理解的问题；这团黏菌设计了一条它无法想象的铁路。计算活在互动之中，而非组件之内。

一则有益的提醒

很容易把这些故事讲成「零件其实暗中聪明」。要抵制这种冲动。涌现的回报就在于，零件可以像它们看起来那样简单。精妙是组织造就的：取决于谁影响谁的模式。这也是为什么涌现容易被过度宣称。一旦你接受简单规则能产出惊人的整体，再往前走一小步，就会宣称你最喜欢的那条简单规则能解释一切。

模型，被磨利

催生一个领域的短语

很长一段时间里，「涌现」是物理学家们带着疑虑说出的词：模糊、略带神秘，仿佛是你缺方程时才会搬出来的东西。1972 年，凝聚态物理学家 Philip W. Anderson 在《科学》上发表了一篇短文，标题后来成为口号：「多即不同」(*More Is Different*)。

Anderson 的靶子是还原论：那种以为一旦掌握基本定律，其余一切就「只不过」是应用物理学的假设。他并不否认还原论。他先承认它，再插入一根楔子，撬开它那傲慢的推论。

「把万物还原为简单基本定律的能力，并不意味着从这些定律出发就能重建宇宙……在复杂度的每一个层级上，都会出现全新的性质。」P. W. Anderson, 《科学》，1972 年。

知道两个水分子如何互动，并不会自动给你湿润、流动、对流胞，或海啸冲岸的具体方式。这些都是集体层面的真实性质，且遵循自身的规律。新的组织层次有自己的规则、概念和科学。化学不只是符号不便的物理学；生物学也不只是词汇更多的化学。每个层次都从下一层涌现，却在某种真实意义上自主。

争论

弱与强：断层线

所有人都同意惊鸟群和黏菌是涌现的。争论的焦点是这个词到底可以涵盖什么。

弱涌现：科学家的版本

哲学家 *Mark Bedau* 给出了大多数工作科学家可以使用的谨慎说明。一个性质是弱涌现的，当且仅当你无法通过巧妙捷径从规则预测它：要知道系统会做什么，唯一办法就是运行它或模拟它。惊鸟群是弱涌现的。没有简单公式能把三条 Boids 规则输入进去、直接吐出明天鸟群的形状；你得让它飞起来。关键是，弱涌现并不神秘，它完全扎根于零件及其互动。

强涌现：激进的版本

一个性质是强涌现的，当且仅当关于整体的事实原则上无法从对零件的完整知识中推导出来，哪怕是一个拥有无限算力的神级模拟器也不行。高层次将拥有真正新的因果能力，包括下行因果。*David Chalmers* 认为，自然界中可能只有一个强涌现的候选者：意识。其余一切都像是弱涌现：令人惊讶，实践中不可还原，原则上却可还原。

为什么不处处拥抱强涌现？因为它撞上 *Jaegwon Kim* 的因果排除问题。假设某个高层次状态导致了一个物理效应。但这个效应在零件层次已经有一个完整的物理原因。要么高层次原因是冗余的，要么效应被过度决定，要么这个主张违反了物理学。捍卫者们有回应，但没有一记 KO。这就是为什么强/弱分界线在生物学、心智与社会系统下仍然活跃。

● 可行的科学

● 有争议

印刷版模型

一个只有两条规则的元胞自动机，却能支持滑翔机、振荡器与通用计算。重要的不是动画，而是没有捷径：许多初始图案必须被运行才能揭示命运。

细胞状态

邻居数量

下一状态

存活

2 或 3 个存活邻居

继续存活

存活	0、1、4、5、6、7 或 8 个存活邻居	死亡
死亡	恰好 3 个存活邻居	变为存活
死亡	其他任意邻居数	保持死亡

请坐稳，想想生命游戏证明了什么。两条规则，作用在一个网格上，就足以构建逻辑门、记忆、时钟和通用计算机。那个「计算机」并不在规则里；它是细胞中的图案。这是弱涌现最干净的图示：你可以完美地知道规则，却仍然别无他法——只能运行它们——才能知道某个初始图案会熄灭、冻结、循环，还是计算。简单法则，无界复杂行为，没有捷径。

必要的绕路

没人能就「复杂」如何测量达成一致

复杂性科学有一个令人尴尬的秘密：复杂还没有一个公认的单一定义。Seth Lloyd 曾汇编过一份著名的清单，列出几十种候选度量，它们彼此并不一致。这不仅仅是草率。「复杂」同时在做几份工作：描述它有多难、建造它有多难、以及它的组织化程度有多高。

最后一类藏着关键思想。最复杂的东西并不是最随机的。想想晶体、活细胞和一瓶气体。按纯粹的「难以描述」标准，气体获胜，因为完美随机需要最长描述。但气体并不比细胞更复杂。晶体太有序，气体太无序。复杂性住在结构化的、令人惊讶的、既非冻结也非随机的中间地带。

图示·复杂度—熵驼峰

无序从左到右递增：左侧是完全有序，右侧是完全随机。有效复杂度就是那条曲线。它在两端崩塌，在中间的有组织地带达到顶峰——生命、语言与心智都住在这里。Murray Gell-Mann 的有效复杂度试图度量一个事物的规律性，同时抛掉纯随机的部分。请记住这个驼峰：组装理论之争，部分就在于这个新指标是否真正捕捉到了这个中间地带，还是只是换了个名字把「难以描述」偷偷塞了进来。

前沿·2026

三条活跃前沿，以及开到最大的前沿校准器

涌现是当今科学中一些最大胆、也最容易被过度炒作的论断的栖息地。今日前沿包含一场在同行评审文献中真实而激烈的混战。

前沿 01 ·最大的一场

● 已确立

● 有前景

● 有争议

组装理论：复杂度标尺，还是万物理论？

2023 年，*Leroy Cronin* 与 *Sara Walker* 领导的团队在《自然》发表了一篇论文，标题为《Assembly theory explains and quantifies selection and evolution》。核心理念很巧妙。拿一个物体，比如一个分子，问：如果可以从小零件开始、并且能复用任何已造出的片段，最少需要多少步才能把它造出来？这个数就是组装指数。把它与拷贝数配对，组装理论声称能检测到选择并复制结构的机制所留下的指纹。杀手级应用是天体生物学：组装指数高于约 15 的分子，被认为极不可能是非生物过程形成的。

这里扎实的东西确实很扎实。组装指数是一个真实、可计算、可实验测量的量。2024 年《ACS Central Science》的一篇论文显示，它能从质谱、核磁共振和红外光谱中读出，而且数据吻合。它在实验室里能区分许多生物样本与非生物样本。

问题在于堆在上面的所有东西。组装理论声称能解释选择、进化、时间和物理—生物桥梁，这些更宏大的论断遭到了强烈反击。*Abraham Zenil* 等人在 2024 年《PLOS Complex Systems》的分析中认为，组装指数在数学上只是标准数据压缩的近似，无法胜过香农熵来完成它所声称的工作。其他批评则攻击生物标志分类和进化论断。

Cronin 与 *Walker* 作出了回应。他们的辩护正是关键：压缩度量的是字符串中的统计冗余，而组装指数关乎物理因果历史——一个真实物体在世界中被造出的最小路径，并与它有多少拷贝相关。这个区分究竟深刻，还是只是表面换皮，正是仍未定论之处。结论：标尺真实存在；万物理论论断尚未确立。

组装理论论断

前沿校准器状态

组装指数是一种可测量的分子复杂度指标。

● 已确立

指数高于约 15 可在未知样本中用作生物标志。

● 有前景

它以生物学认可的方式解释并量化了选择与进化。

● 有争议

它在根本上不同于压缩、柯尔莫戈罗夫复杂度与香农熵。

● 有争议

前沿 02

● 已确立

● 有争议

自组织临界性：自己调谐的沙堆

1987 年，*Per Bak*、*Chao Tang* 和 *Kurt Wiesenfeld* 提出了一个迷人的想法：某些系统无需外部调谐，就能把自己驱赶到相变的刀锋边缘。他们的模型是一个沙堆。一次撒一粒沙，沙堆变陡，直到各种规模的雪崩把它维持在临界坡度附近。这种自组织临界性一度成为地震、森林火灾、物种灭绝、市场崩盘和 $1/f$ 噪声的候选解释。

SOC 是真实的：沙堆类模型确实会自组织到临界性。但它作为复杂性普适引擎的宏大论断并未站稳脚跟。最被炒作的的应用——「临界大脑」假说——仍有争议。一种美丽的机制被过度推销成了万物理论。

能给涌现本身标个数字吗？

最新前沿试图把弱涌现与强涌现从扶手椅辩论搬进数学。*Erik Hoel* 与同事发展了因果涌现，用有效信息证明，宏观模型有时能比它由之建立的微观模型携带更多因果信息。*Fernando Rosas*、*Pedro Mediano* 与同事则用信息分解来检验：某个宏观特征是否能比任何单独零件更好地预测系统的未来。

这是细致而富有成果的工作，因此配得上「有前景」。但解释上要谨慎。批评者认为，这些度量捕捉的可能是认识论涌现——关于我们最好的模型与描述——而非哲学家所说的本体论强涌现。数学正在落地；它测量的是什么，仍在争论。

开放问题

真正未定论的问题

- 强涌现在任何地方都是真实的吗？还是一切都是弱涌现——令人惊讶但可还原，Kim 的排除论证正在悄悄获胜？
- 下行因果是真实的力量，还是修辞？整体是否能在微观定律未能涵盖的方面，真正推动它的零件？
- 是否存在一个原则性的复杂度度量？还是我们永远只能有一抽屉度量，每种只适合一种工作？
- 组装理论是否切中了自然的新关节？还是它只是有用的压缩与信息理论，包装了超出其兑现能力的宏大声明？
- AI 涌现又如何？当大语言模型随着规模扩大而似乎获得新技能时，那是真正的涌现，还是指标的产物？先记住这个问题，第 139 日再回来看看。

今日三句话

大观念

遵循局部规则的简单零件，可以在没有领导、没有蓝图的情况下生成全局秩序。「多即不同」道出了更高层次可以拥有自己真实模式与法则这一事实。

最佳类比

那只没有鸟能看见其形状、却会呼吸的椋鸟群，以及那个无法理解铁路、却能计算出一条铁路的黏菌。

活跃争议

组装理论是一把真实的分子复杂度标尺，但它对选择、进化与时间的解释力仍有争议。

涌现得到正式定义·信息以压缩与组装指数的形式回归·计算在生命游戏中现身·能量流暗示生命。

来源与延伸阅读

1. Ballerini, M., Cabibbo, N., Candelier, R., et al. (2008). "Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance." *PNAS* 105(4): 1232-1237. doi:10.1073/pnas.0711437105.
2. Cavagna, A., Cimarelli, A., Giardina, I., et al. (2010). "Scale-free correlations in starling flocks." *PNAS* 107(26): 11865-11870.
3. Reynolds, C. W. (1987). "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model." *Computer Graphics* 21(4): 25-34.
4. Anderson, P. W. (1972). "More Is Different." *Science* 177(4047): 393-396. doi:10.1126/science.177.4047.393.
5. Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., et al. (2010). "Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design." *Science* 327(5964): 439-442. doi:10.1126/science.1177894.
6. Gardner, M. (1970). "Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'life.'" *Scientific American* 223(4): 120-123.
7. Bedau, M. A. (1997). "Weak Emergence." *Philosophical Perspectives* 11: 375-399.
8. Chalmers, D. J. (2006). "Strong and Weak Emergence." In *The Re-Emergence of Emergence*, Oxford University Press.
9. Kim, J. (1999). "Making Sense of Emergence." *Philosophical Studies* 95: 3-36.
10. Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. (1987). "Self-organized criticality." *Physical Review Letters* 59(4): 381-384. doi:10.1103/PhysRevLett.59.381.
11. Bonachela, J. A., et al. (2010). "Self-organization without conservation: are neuronal avalanches generically critical?" *J. Stat. Mech.* P02015. arXiv:1001.3256.
12. Sharma, A., Czege, D., Lachmann, M., Kempes, C. P., Walker, S. I., and Cronin, L. (2023). "Assembly theory explains and quantifies selection and evolution." *Nature* 622: 321-328. doi:10.1038/s41586-023-06600-9.
13. Marshall, S. M., Mathis, C., Carrick, E., et al. (2021). "Identifying molecules as biosignatures with assembly theory and mass spectrometry." *Nature Communications* 12: 3033.
14. Jirasek, M., Sharma, A., Bame, J. R., et al. (2024). "Investigating and Quantifying Molecular Complexity Using Assembly Theory and Spectroscopy." *ACS Central Science* 10(5): 1054-1064.
15. Abrahao, F. S., Hernandez-Orozco, S., Kiani, N. A., Tegner, J., and Zenil, H. (2024). "Assembly Theory is an approximation to algorithmic complexity based on LZ compression that does not explain selection or evolution." *PLOS Complex Systems* 1(1): e0000014.
16. Uthamacumaran, A., Abrahao, F. S., Kiani, N. A., and Zenil, H. (2024). "On the salient limitations of the methods of assembly theory and their classification of molecular biosignatures." *npj Systems Biology and Applications* 10: 82.
17. Jaeger, J. (2024). "Assembly Theory: What It Does and What It Does Not Do." *Journal of Molecular Evolution* 92: 87-92.
18. Walker, S. I., Cronin, L., et al. (2024). "Reply to 'Experimental measurement of assembly indices are required to determine the threshold for life.'" *Journal of the Royal Society Interface* 21: 20240367.
19. Gell-Mann, M., and Lloyd, S. (1996). "Information measures, effective complexity, and total information." *Complexity* 2(1): 44-52.
20. Hoel, E. P., Albantakis, L., and Tononi, G. (2013). "Quantifying causal emergence shows that macro can beat micro." *PNAS* 110(49): 19790-19795.
21. Rosas, F. E., Mediano, P. A. M., Jensen, H. J., et al. (2020). "Reconciling emergences: An information-theoretic approach to identify causal emergence in multivariate data." *PLOS Computational Biology* 16(12): e1008289.

22. Dewhurst, J. (2021). "Causal emergence from effective information: Neither causal nor emergent?" *Thought* 10(3): 158-168.
23. Schaeffer, R., Miranda, B., and Koyejo, S. (2023). "Are Emergent Abilities of Large Language Models a Mirage?" *NeurIPS 2023*.