



求索大脑智慧本质，照亮类脑智能之路

郭爱克^{1,2,3,4,5,6}*

¹⁾ 北京师范大学珠海校区自然科学高等研究院复杂系统国际科学中心, 珠海 519000;

²⁾ 中国科学院生物物理研究所脑与认知科学国家重点实验室, 北京 100101;

³⁾ 中国科学院神经科学研究所神经科学国家重点实验室, 上海 200031; ⁴⁾ 中国科学院上海微系统和信息技术研究所, 上海 200050;

⁵⁾ 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049; ⁶⁾ 上海大学生命科学学院, 上海 200444)

摘要 宇宙创生→生命爆发→智能演生→人工智能, 这是一条演化的历史长河。时代在问, 脑与心智从哪里来, 将到哪里去? 人工智能的前途和命运是怎样的? 人类文明的前途和命运是怎样的? 大脑智能和人工智能怎样才能相互照亮? 是否有不依赖于大数据、大算力和大模型的智能路线? 人工智能可否通过完全不同于生物进化的另一条道路通向“心智”? 脑智创造力如何演化为新质生产力? 这些问题的核心仍然是人类大脑在整体上是怎样工作的? 本文将从微观—介观—宏观—宇观的尺度上来勾勒一幅复杂性与简约性辩证统一的图景。

关键词 心智, 复杂性, 自组织, 跨膜态, 神经流形, 脑-智方程, 动力学系统, 神经状态空间

中图分类号 Q6, Q11, Q189

DOI: 10.16476/j.pibb.2024.0196

子曰“五十而知天命”(《论语·为政篇》), 祝贺《生物化学与生物物理进展》天命之年, “生生不息”, “更上一层楼”。

生物学和物理学的飞速发展, 蕴育了生物物理学。脑-智科学与生物物理学是亲兄弟。50年来, 我主要耕耘在脑-智科学方向。当代科学与技术正处在大发展、大交叉、大融合的时代, 正在向微观、介观、宏观、宇观进军, 正在向深海、深地、深空、量子、超算、大数据、大模型、通用智能、“脑海”深处进军。物质科学、信息科学、生命科学和智能科学正在相互照亮, 这是科学技术发展的必然逻辑。从宇宙创生→生命爆发→智能演生→人工智能→人类文明的前途和命运, 这是一条演化的历史长河(图1)。时代在问, 脑与心智从哪里来, 将到哪里去? 人工智能的前途和命运是怎样的? 人类文明的前途和命运是怎样的? 大脑智能和人工智能怎样才能相互照亮? 是否有不依赖于大数据、大算力、大模型的智能路线? 人工智能可否通过完全不同于生物进化的另一条道路通向“心智”? 对于上述的“时代之问”, 我想从以下5个方面浅谈。

1 彻底的脑与心智的演化观

正如演化论大师杜布赞斯基(Theodosius Dobzhansky, 1900–1975)所言:“只有从演化的角度才能理解生物学(Nothing in biology makes sense except in the light of evolution)”。我们同样可以说, 只有从演化和选择的角度才能理解脑与心智的关系(brain and mind relationship)。

老子论道:“道可道, 非常道”, “道生一, 一生二, 二生三, 三生万物”, “万物负阴而抱阳, 冲气以为和”(《道德经》)。当我们将老子道生万物的“一二三”法则与达尔文进化论^[1]的观点——“生命从如此简单的源头, 演化出了无穷尽的、最美丽的和最奇妙的类型, 且演化还在继续着(From so simple a beginning endless forms most beautiful and most wonderful have been, and are being, evolved)”放在一起阅读时, 是多么具有启

* 通讯联系人。

Tel: 010-64888532, 021-54921785, E-mail: akguo@ion.ac.cn

收稿日期: 2024-05-08, 接受日期: 2024-7-20



Fig. 1 The long river map of evolutionary history, from the creation of the universe, the explosion of life, intelligent evolution to artificial intelligence

图1 演化历史长河图，从宇宙创生，生命爆发，智能演生，到人工智能

发性啊！美哉，双螺旋！DNA双螺旋发现者之一克里克（Francis Crick，1916–2004）指出：“生命体系中没有像物理学和化学那样铁的定律，演化产生机制，而且多半是亚级机制。在生命系统中，几乎很少有对一切生物问题普适的“规则”^[2]。进化论解释了“为什么（Why）”，为什么演化出如此种类繁多形态各异的生物？DNA双螺旋解释了“如何（How）”，如何形成千变万化的生物？但是，达尔文的自然选择法（则）也并不是人类存在的全部。达尔文并不知道“事物存在自我组织的力量，即：将自己组织成日益复杂的系统的持续力量”。达尔文也并不知道“秩序和自组（织）的力量创造了有生命的系统，就像创造了雪花这种形式……生命的故事确实是一个关于秩序的故事：它表现了一种融于大自然经纬之中的深刻的，内在的创造力”^[3]。

“寒武纪生命大爆发也许是自组织临界性的机制所导致，它可能不仅是一次规模巨大的爆发式的演化事件，更为重要的是这一事件具有明显的自发性进化行为，是生命进化过程中一个自组织事件”^[4]。“大脑不是逐渐缓慢地进化，而是突然爆发式地演化”^[5]。在你死我活的残酷生存竞争中，以及呈加速度扩张的“军备竞赛”的压力下，脑的进化策略很早就不再依赖于细胞以下的生物大分子层面的循序渐进，而是通过细胞以上的介观层面、网络层面、系统层面的，由神经元大规模相互作用

而出现的自发的自组织多样性和选择稳定机制来适应不断变化的环境。今天的智力—智能—智慧的演化过程可能主要是应对构建大规模的复杂社会群体的挑战，当然还包括应对生态与环境的挑战。

2 脑网络架构跨物种保守性

如同“哺乳动物的血压都是类似的，无论其体形的大小”^[6]，大脑网络架构的一般原理具有跨物种和跨尺度的保守性^[7-8]。所有动物的大脑都表现出一定程度的模块化（modularity），甚至线虫只有302个神经元的网络也具有模块化结构^[9]，构成了11个所谓的“富人俱乐部（rich clubs）”。模块内节点之间的连接比模块间节点之间的连接更强^[10]。中心枢纽、层次结构、幂律规律（power-law）存在于许多复杂神经网络中。幂律法则是一个量随另一个量的幂而变化的函数关系（ $f(x)=ax^{-k}$ ），而与初始值无关。“这一系统性的重复行为被称作标度不变性或自相似性（scale invariance or self similarity）”。我们研究的结构和动力学都有着自相似的特点，都可以通过数学上的幂律呈现。“分形、自相似性在不同程度上普遍存在于宇宙之中。从银河系和星云到你的细胞、你的大脑、互联网、公司和城市等”^[6]。在这个意义上，我们甚至可以说，我们每个人都有自己的“银河”，每个人都有自己的“历史长河”（图2）。



Fig. 2 Cosmology tells us that in a diameter of up to 100 000 light-years, in the Milky Way, which has hundreds of billions of stars, we Earthlings are most likely the only intelligent beings. There is me in the Milky Way, and within me there is the Milky Way. Fractals and self-similarity, and humans are very small but exploration is great (Photographer: XIE Yue)

图2 宇宙学告诉我们，在直径长达十万光年，拥有上千亿颗恒星的银河系中，我们地球人很可能是唯一的智慧生物。银河中有我，我中有银河，分形自相似，人类很渺小，探索很伟大 (照片拍摄：谢玥)

在自然界，模块化和层次结构的优势体现在可拓展性 (scalability)、可进化性 (evolvability)，即通过对现有的模块相互联结的小修小改，即可应对挑战和发展新特性的能力和鲁棒性，以及在有内部或外部扰动的前提下，可以通过现有的模块，以不同的方式来维系某种功能的鲁棒性^[9]。如“沙漏”模块 (the hourglass organization)、“领结芯 (bow-tie)”模块、“海内存知己，天涯若比邻”的“小世界网络”模块 (small world network)，以及“富人俱乐部”模块等，各司其责，相互协同。例如，果蝇嗅觉“沙漏原理”超越了传统的最近邻搜索哈希加密算法 (Ashing locality-sensitive algorithm)^[11]。道法自然，大自然比我们更聪明。当然，这些网络架构也是在不断演化和修饰，它们背后都有各自的物理学起因，各自的因果关系。

3 脑心智的整体性和复杂性

“多则异也 (more is different)”^[12]。“具有将所有东西都简化到最简单的基本规律的能力，并不意味具有能从这些最简单的基本规律着手，重构宇

宙的能力”^[3]。著名物理学家斯蒂芬·霍金 (Stephen Hawking, 1942–2018) 认为“21世纪是复杂性世纪”。“复杂性和复杂适应系统，几乎覆盖了今天的科学和社会学面临的所有重大挑战和重大问题，它们也总是跨越传统的学科边界，相关性并不意味着因果关系。”^[6]一个典型的复杂系统是由无数个体或因子组成的，它们聚集在一起会呈现出集体特性。整体的系统行为被称作“涌现行为 (emergence behavior)”。与涌现、自组织概念密切相关的是根据变化的外部条件不断适应和进化的能力。如何从复杂系统科学的思维，求索脑与思维的关系 (brain-mind)、物质与精神的关系 (mind from matter)，回答人类大脑作为一个复杂的整体 (complex whole) 是怎样工作的，这是战略制高点。

Chang 和 Tsao^[13]的研究发现了大脑对“颜值 (face value)”的群体编码。大脑并不是用一个特定的面孔细胞编码一个特定的面孔，即“一对一”，而是由一个面孔细胞同时参与对多个面孔特征编码，反过来，一个面孔特征也同时被多个面孔

细胞编码^[13], 是“一对多, 多对一”的关系。在大脑中并没有专门识别你的祖母面孔的“祖母细胞 (grandmother cell)”。又例如, 时序工作记忆的群体编码。歌为什么不能倒着唱? 对于复杂认知功能来说, 了解事物发生的先后顺序至关重要。大脑作为高维复杂动力学系统, 其状态可约束在低维子空间的神经流形 (low-dimensional manifolds) 里^[14]。系统的维数是指描述其所有状态所需的自变量的数量。Xie 等^[14]采用猕猴执行视觉空间序列工作记忆任务的实验范式, 用光遗传学技术在体记录了前额叶皮层 5 325 个神经元, 揭示了时序工作记忆 (sequence working memory, SWM) 的高维神经状态空间可分解为低维状态子空间之和, 实现“时间换空间 (time into space)”。

脑科学与人工智能正在相互照亮。例如, 人工智能的强化学习启发了脑科学的多巴胺分布式价值概率表征理论 (distributional code for value in dopamine-based reinforcement learning)^[15], 取代“大锅饭”式的期望值或平均值表征, 大幅度提高了强化学习效率。而且, 这种多巴胺的概率表征与脑健康密切相关。

4 复杂性背后的简约性法则

2021 年诺贝尔物理学奖得主乔治·帕里西 (Giorgio Parisi) 曾经说过, “他的大部分研究都涉及简单的行为如何产生复杂的集体行为, 这对于自旋玻璃和椋鸟而言同样适用”。事务是辩证的, 在“复杂性”的背后, 真的蕴藏着简单性。哲学家叔本华 (Arthur Schopenhauer, 1788-1860) 说过, “简约性永远是真理和天才的共同特征”。以我们对果蝇认知研究为例。2005 年, 我们在《科学》(Science) 发表了果蝇跨视觉和嗅觉模态整合和概念形成的研究^[16]。中国字“鲜”的发明 (鱼+羊=鲜) 体现了脑科学智慧。鱼是鲜的一种模态, 羊是另一种鲜的模态, 鱼羊的非线性叠加, 就更鲜了。模态是一个复杂的概念, 一个模态即一个符号系统, 可借助一个特定的感知过程而被识别。我们的研究发现, 果蝇具有嗅觉-视觉记忆整合和转移能力, “1+1>2”。这符合反向有效性原理: 当单独感觉刺激输入的有效性降至最低时, 跨模态增强将达到最大值。进一步, 我们用感觉预处理范式 (sensory preconditioning paradigm) 发现, 视觉模态记忆条件化可以“免费”地传递给嗅觉模态 (自身并未经过条件化), 反之亦然。2023 年, 英国一

个著名实验室采用与我们相似的实验设计和逻辑, 进一步挖掘了果蝇视-嗅跨模态交互定位在哪里, 以及跨模态记忆扩张的细胞分子环路机制: 多巴胺能神经元首先解除 γ 氨基丁酸 (GABA) 能神经元对兴奋性 5-羟色胺能背侧配对内侧神经元 (excitatory serotonergic dorsal paired medial neuron, DPM 神经元) 的抑制作用, 这样, 特定的跨越肯扬细胞 (Kenyon cells, KCs) 脑区的 5-羟色胺能神经元环路, 可以在两个预先已经分工的模态之间架起兴奋性联结之桥^[17]。通过这种跨模态绑定方式, 原来只表征单个模态记忆印迹的 KC 环路, 被扩展为也能表征另一个模态的 KC 环路。这项研究证明了果蝇脑可以实现像哺乳动物脑那样的依赖海马脑区的学习范式。果蝇视嗅跨模态增强的神经过程堪比弦乐四重奏 (string quartet)。“四位演奏者”分别为多巴胺能神经元、GABA 能神经元、DPM 神经元, 以及蘑菇体 KC 神经元。

5 人类的大脑是宇宙的表征

1619 年, 天文学家开普勒 (Johannes Kepler) 发表了《宇宙的和谐》^[18]。他一直怀有宇宙是一个和谐整体的强烈信念, 描述了音乐和数学, 音乐和宇宙规律的共通性。我们的大脑有 1 000 亿神经细胞, 10^6 亿神经联结, 神经纤维总长度 1.8×10^5 km, 可绕地球 4 周, 真是“坐地日行八万里, 巡天遥看一千河” (毛泽东, 七律《送瘟神》)。庄子曰: “天地与我并生, 而万物与我为一” (《庄子·内篇·齐物论》)。

海森堡指出: 心智是通过脑和行为的互动而演化 (mind from matter-via brain and behavior)^[19]。

参照爱因斯坦的物质-能量方程: $E=mc^2$, “在牛顿力学, 能量正比于动量平方: 一个物体运动得越快, 它的能量就越大。当一个物体静止时, 换言之, 当它的动量是零时, 它的能量就是零。爱因斯坦改变了这种关系, 使得当一个物体静止时, 它的质量乘以光速平方那样大的能量。爱因斯坦的逻辑推理, 使人类理智能够发现自然的一个最深层的秘密”^[20]。

我们将心智 (mind)、大脑 (brain)、行为 (behaviour) 三者的关系表达为: $\text{mind}=(\text{brain}) \times (\text{behaviour})^3$, 指数 3 表示多次重复行为, 含“三生万物”之意。

脑-智科学正在描绘一幅关于精神活动如何从基因-脑-行为-环境的精致协调互动中演生涌现的生

动图景，并将对人工智能的深度演化产生积极而深远的影响。

物质变精神，精神变物质，脑智创造力，新质生产力，道路多曲折，未来更美好。

参 考 文 献

- [1] Darwin C. On The Origin of Species. London: John Murray, 1859
- [2] Crick F. What Mad Pursuit: a Personal View of Scientific Discovery. New York: Basic Books, 1990
- [3] 米歇尔·沃尔德罗普. 复杂-诞生于秩序与混沌边缘的科学. 陈玲, 译. 北京: 生活·读书·新知三联书店, 1997
- Mitchell M W. Complexity: the Emerging Science at the Edge of Order and Chaos. Chen L, translate. Beijing: SDX Joint Publishing Company, 1997
- [4] 梅可玉. 论自组织临界性与复杂系统的演化行为. 自然辩证法研究, 2004, **20**(7): 6-9, 41
- Mei K Y. Stud Dialectics Nat, 2004, **20**(7): 6-9, 41
- [5] Ramachandran V S, Blakeslee S. Phantoms in the Brain, Probing the Mysteries of the Human Mind. New York: HarperCollins, 1999
- [6] 杰弗里·韦斯特. 规模. 张培, 译. 北京: 中信出版社, 2018
- Geoffrey West. Scale. Zhang P, translate. Beijing: CITIC Publishing, 2018
- [7] van den Heuvel M P, Sporns O. Network hubs in the human brain. Trends Cogn Sci, 2013, **17**(12): 683-696
- [8] de Reus M A, van den Heuvel M P. Rich club organization and intermodule communication in the cat connectome. J Neurosci, 2013, **33**(32): 12929-12939
- [9] Towilson E K, Vértes P E, Ahnert S E, *et al.* The rich club of the *C. elegans* neuronal connectome. J Neurosci, 2013, **33**(15): 6380-6387
- [10] 杰伊·N·吉德. 冲动与冒险: 解构青春期大脑. 冯泽君, 译. 环球科学, **2015**(7): 36-41
- Giedd J N. Impulse and Adventure: deconstructing the Adolescent Brain. Feng Z J, translate. Scientific American (Chinese), **2015**(7): 36-41
- [11] Dasgupta S, Stevens C F, Navlakha S. A neural algorithm for a fundamental computing problem. Science, 2017, **358**(6364): 793-796
- [12] Anderson P W. More is different: broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. Science, 1972, **177**(4047): 393-396
- [13] Chang L, Tsao D Y. The code for facial identity in the primate brain. Cell, 2017, **169**(6): 1013-1028.e14
- [14] Xie Y, Hu P, Li J, *et al.* Geometry of sequence working memory in macaque prefrontal cortex. Science, 2022, **375**(6581): 632-639
- [15] Dabney W, Kurth-Nelson Z, Uchida N, *et al.* A distributional code for value in dopamine-based reinforcement learning. Nature, 2020, **577**(7792): 671-675
- [16] Guo J, Guo A. Crossmodal interactions between olfactory and visual learning in *Drosophila*. Science, 2005, **309**(5732): 307-310
- [17] Okray Z, Jacob P, Stern C, *et al.* Multisensory learning binds neurons into a cross-modal memory engram. Nature, 2023, **617**(7962): 777-784
- [18] Kepler J, Welt Harmonik. Munchen: R. Oldenbourg, 1982
- [19] Heisenberg M. "Mind from Matter?" - Über Verhalten und Gehirn. Neuroforum, 2018, **24**(2): 121-128
- [20] 阿·热. 可怕的对称: 现代物理学中美的探索. 荀坤, 劳玉军, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2002
- Zee A. Fearful Symmetry. Xun K, LAO Y J, translate. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2002

Exploring The Essence of Brain Intelligence and Illuminating The Path of Brain Like Intelligence

GUO Ai-Ke^{1,2,3,4,5,6}*

¹International Complex Systems Science Center(IACCS), Advanced Institute of Natural Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai 519000, China;

²State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³CAS Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Institute of Neuroscience, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China;

⁴Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

⁵School of Life Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁶School of Life Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract From the creation of the universe to the explosion of life, to intelligent evolution, and to artificial intelligence, this is a long river of evolution. The times are asking, where do the brain and mind come from and where will they go? What is the future and destiny of human civilization? How can brain intelligence and artificial intelligence illuminate each other? Can artificial intelligence lead to the “mind” through a completely different path from biological evolution? How does intellectual creativity evolve into New Quality Productivity? The core of these questions is still how the human brain works as a whole? Here, I will outline a dialectical unity of complexity and simplicity at the micro-meso-macro-cosmological scale.

Key words mind, complexity, self-organization, transmembrane state, neural manifold, brain-mind equation, dynamical system, neural state space

DOI: 10.16476/j.pibb.2024.0196

* Corresponding author.

Tel: 86-10-64888532, 86-21-54921785, E-mail: akguo@ion.ac.cn

Received: May 8, 2024 Accepted: July 20, 2024