

复杂网络科学可以解释生命现象吗？

刘宗华 (华东师范大学物理与电子科学学院 上海 200241)

摘 要 复杂网络科学是近年来发展起来的一门新学科,它揭示了一系列重要现象背后的内在机制,极大地拓展了我们的视野,甚至改变了我们的许多认知。本文从复杂网络科学的角度来探讨生命现象赖以存在的物理机制,力图阐述生命特征可以在动力学振子的集体行为方面得到解释,即生命体可以在复杂网络的框架下被物理学原理解释。

关键词 复杂网络科学 生命现象的物理机制

文章编号 1002-0748(2021)10-0002

中图分类号 G633·7

文献标识码 A

众所周知,物理学与生命科学是两个平行的学科,但它们之间似乎又存在着千丝万缕的联系。一方面,研究生命科学的设备与方法大多来自于物理学;另一方面,生命科学又不断地为物理学提供新的研究对象与课题。这就引出了一个十分重要的问题:物理学可以解释生命现象吗?或者说生命体可以被物理学理解吗?为寻找其答案,许多人在无尽的时间长河中付出了极大的努力,直至近年来终于迎来了突破的曙光^[1]。笔者在长春举办的“第六届全国统计物理与复杂系统学术会议”(2021年7月30日—8月2日)的报告中试图触碰一下这个问题,谈了自己的一点粗浅理解与认识。本文就围绕其中的三张图片对大脑认知的机理做些讨论,不对之处,敬请批评。

第一张图片是关于大脑研究的动机与目的,如图1所示。每个人有两个与生俱来的特征:好奇心与成就感。前者从开尔文勋爵等西方物理学家的出生背景可见一斑,他们大多出生于名门贵族,衣食无忧,做科研绝不是为了解决温饱问题,而是借此满足心灵的好奇。后者则是我们通常所说的兴趣与爱好,因为兴趣是成绩堆积起来的。比如你打球常常赢,就会越来越有兴趣,久而久之就成为了你的爱好。学习也是如此,学习好的同学非常喜欢上学,而学习差的同学很多时候是在家长的逼迫下才不得不去的。我们现在研究非线性动力学与复杂网络实际上就是想搞清楚这两个特征背后的物理机制,具体做法是根据对大脑进行解剖所获得的知识,建立基于微观神经元的耦合振子物理模型,研究什么样的相互作用才能产生出宏观的好奇心与成就感。当

然,这个问题很大,我们许多人都在自觉或不自觉地从从事这方面的相关研究,这里不做展开讨论。

问题: 大脑研究的终极目的 好奇心、成就感 → 物理机制

物理学	生命科学
<ul style="list-style-type: none">· 物质由原子组成· 原子没有生命特征· 多体相互作用现出集体行为	<ul style="list-style-type: none">· 生命体由细胞组成· 细胞有生命特征· 多体相互作用现出记忆与认知等脑功能
· 物理学原理 → 生命科学?	· 细胞由原子构成 → 能被物理学理解吗?

图 1

比这个问题小一些的是物理学和生命科学的关系问题,也就是本文想要讨论的中心问题。我们知道,物质由原子组成,而原子没有生命,所以自然界的物质如金、木、水、火、土等就没有生命,即使很漂亮的物质如钻石晶体等也都没有生命。但生命体则不同,它由细胞组成,而细胞有生命特征,由细胞构成的各种生物就是我们看到的植物与动物等。但是,原子与生命体这两者之间,实际上有个过渡体,可以称为动力学振子。比如 Chua 电路描述的振子就是由原子构成的电路产生的,其他的典型振子如 Lorenz 振子与 Rossler 振子等也是如此,均没有生命但有动力学行为。从这个意义上来说,细胞也可以描述为动力学振子,比如神经元振子。这样一来,无生命特征的原子与有生命特征的细胞就在动力学振子这个层面上统一起来了。实验与理论均发现,当这些无生命特征的振子与有生命特征的振子分别

以群体的方式出现时是可以表现出一定的相似性的。对于无生命特征的动力学振子, 现已发现多个振子的相互作用可以产生有趣的集体行为, 如同步化、奇异态、遥同步与集团同步等^[2-4], 统称为涌现。同样, 当多个细胞或神经元发生相互联系时, 它们的相互作用就会导致认知与记忆等强大的脑功能。实验证实, 每种脑功能的出现是通过特定部分神经元的同步化来实现的, 实际上也是一种涌现。所以, 在多体相互作用的层次上, 我们看到动力学振子的集团与生命体表现出了相似的涌现行为。

这就引出了一个更本质的问题: 细胞也是由原子组成的, 但却表现出生命的特征, 为什么? 仔细研究一下细胞就会发现, 组成细胞的原子与组成晶体的原子有截然不同的排列方式。众所周知, 组成晶体的原子是一种规则的排列方式, 比如体心立方结构或面心立方结构等, 但组成细胞的原子却不是规则的排列, 而是按照非常特殊的方式排列成有机的结构, 并且是由多种原子组成的复杂结构。同样地, 产生动力学振子的特定电路也是多种原子以非常特殊的方式排列出来的。从这里可以得出一个初步的结论: 复杂的特定排列方式是造成动力学或生命特征的原因之一。基于此, 我们可以借助动力学振子这个过渡体来理解生命体, 借助耦合振子宏观动力学的涌现来理解大脑认知与记忆的产生, 因此有理由相信: 物理学可以解释生命科学, 同时生命科学可以被物理学理解!

第二张图片是关于人们对世界的认识过程, 如图 2 所示。世上的人们可以分为不同的群体, 芸芸众生属于一般人群体。这个群体中的人们用七窍感知世界, 看到的是花花世界、鸳鸯蝴蝶, 眼前的一切是那么的美好, 甚至好过古代的皇家生活。虽然每天要为生活奔波, 但内心深处却是只羡鸳鸯不羡仙。第二类群体是修行者群体, 特别是古代的修行者, 比如中国的和尚、道士、尼姑等, 他们能修炼出一双慧眼, 可透过美丽或丑陋的皮囊看见内在的品质。他们的七窍重在感悟、体会表象背后的深层次东西, 而不注重现实的花花世界, 因此看到的是一花一世界、一木一浮生、一草一天堂、一叶一如来、一砂一极乐、一方一净土、一笑一尘缘、一念一清静。在这个境界上, 能初步感知生命或世界的本源。现在看来, 这些表述依然深刻, 但没有深入到总结出原理或公式的地步, 即停留在只可意会不可言传的阶段。

第三类群体的产生开始于 300 年前以牛顿为代表的西方科学家的诞生。他们突破了只可意会的层

大脑网络如何“看”世界?

- 一般人看世界: 用七窍 → 花花世界 → 只羡鸳鸯不羡仙!
- 修行者看世界: 一花一世界, 一木一浮生, 一草一天堂, 一叶一如来, 一砂一极乐, 一方一净土, 一笑一尘缘, 一念一清静。 → 只可意会!
- 物理学家看世界: 看山不是山 → 看物理规律! → 可言传!
- 脑科学家看世界: 高维网络世界 → 关系? → 看灵魂、生命?

图 2

面, 将事物的内在规律总结成公式或原理而流传开来, 比如牛顿的巨著《自然哲学的数学原理》。与第二类群体相同的是, 他们同样看山不是山、看水不是水。但不同的是他们以实验与推理代替了感悟与体会, 从而能推导出现象背后的物理规律, 使得研究成果从不可言传变成可言传。这样一来, 后人不再需要重走前人的老路而浪费大量宝贵的时间, 而是通过学习来实现传承并迅速达到前人的高度, 然后将宝贵的时间用于新的研究与发现, 大大加速了科学研究的进程, 这便是现代社会知识爆炸的根源。

第四类群体即最后一类群体产生于近年来关于复杂网络的研究。此时人们的思维不再局限于单体或少数单体相互作用的系统, 而是从低维空间跳跃到了高维空间, 系统的维数大大增加。如果回头来看第二类群体, 可以发现他们是在低维空间中通过蛛丝马迹来推断高维空间中的动力学行为, 实际上推断出的是高维空间在低维空间中的投影, 很辛苦。现在, 第四类群体直接在高维空间中自由翱翔, 看到的不再是低维空间中的投影, 而是动力学的全貌。在这里, 网络节点间的大量连接代表了节点间的相互作用, 是导致集体行为涌现的直接原因。在社会或大脑网络等系统中, 这种连接代表的是节点间的相互关系。特别地, 在脑功能网络中, 这种连接甚至是时间序列间虚拟的相互关联。当某种集体行为出现时, 系统动力学就会局域到一个子空间中, 因此前面所述的涌现等集体行为实际上是高维动力学行为在低维空间中的塌缩。在这个意义上我们看到通常所谈的物质只是节点的集合, 而忽略了节点之间相互关系的影响。当这种相互关系不再是规则的, 而是非均匀的复杂网络连接时, 它便具有了飘忽不定的特点; 而当连接的权重分布非均匀且随时间变化时, 它便表现为一会儿大、一会儿小、一会儿有、一会儿无, 具有了“灵魂”的特征。这样一来, 复杂网络科学就有可能阐释涌现的物理机制, 初步揭示出生命体与动力学振子的集体行为间的对应关系。

第三张图片是关于大脑神经元的团簇放电行为, 如图 3 所示。我们知道大脑有 860 亿个神经元, 每个

神经元有 1 000 条左右的连接,因此大脑神经网络非常庞大。这个庞大的网络如何布置在大脑这个非常有限的体积内就是一门艺术,是大脑亿万年进化的自然选择,其结果是按打皱的方式进行排列,如果展开则有 $2\,500\text{ cm}^2$,相当于一块小桌布。大脑的任务是承担强大的认知与记忆功能,这就需要超高的效率与超强的能量保证。为此,大脑进化出了两个特征:分块计算与信息整合(segregation and integration)。在大脑执行某个具体任务时,为节约能量,不容许全部神经元都卷入,而是只由特定的神经元模块——认知网络来完成。为了提高效率,大脑在不同的脑区之间形成了少量的长程连接^[5]。此外,为防止受伤后大脑其他功能的连带受损,大脑结构分成左、右两部分,中间由胼胝体连接,且每一个半球又由不同的社区结构构成,从而保证了大脑功能的鲁棒性。

大量的神经元如何产生意识?

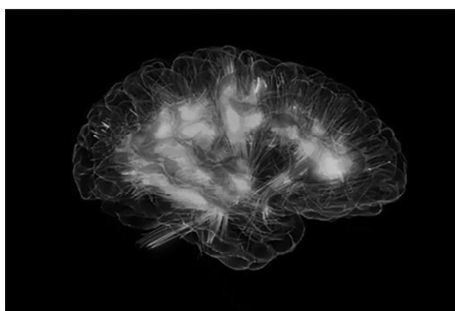


图 3

大脑的神经元有两种状态:放电与静息。当神

(上接第 59 页)

本题障碍设置了两大难点,一是磁场是变化的磁场,容易诱导考生以为既有动生电动势又有感生电动势,而实际磁感应强度 B 仅随位置变化,不随时间变化;二是金属棒 MN 长度 L 是导轨间距 d 的两倍,因此 MN 两端的电势差有隐藏着的临界问题,它由三部分构成:两段导轨与电阻 R 串联成的这三个电阻的路端电压加上分别以 M 、 N 为端点的在导轨外侧的这两段棒产生的动生电动势。通过这样设置临界问题,基本概念不清的考生就容易坠入陷阱里了。

4 结束语

显然,物理试题的改编看似无法可依,实则有章可循。只要平时多琢磨、多尝试,在命题中就会很自然地运用这些改编原则、技巧和方法,久而久之物理

神经元杂乱无章地放电时,表现出一种涨落行为,平均值极小;而当某些脑区或认知网络的神经元同步放电时,表现出稳定的动力学行为,便可承担特定的功能。但也不能让所有的脑区全都同步放电,否则大脑中枢神经指挥系统将无所适从,从而导致通常所说的神经疾病比如癫痫病等。因此,大脑功能的实现是通过部分神经元振子的同步来完成的。在这个意义上可看出,神经元振子的同步与其他动力学振子的同步遵从相同的法则。通过研究它们的部分同步态,如奇异态、遥同步与集团同步等^[2-4],将有助于理解认知与记忆功能的微观机制,从而理解生命体背后的物理机制。尽管这条路艰难而曲折,但目前已看到了曙光,相信有志于此研究领域的工作者定会纵情驰骋、翱翔九州。

参考文献

- [1] 刘宗华. 混沌动力学基础及其在大脑功能方面的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] S. Huo, C. Tian, M. Zheng, S. Guan, C. S. Zhou, Z. Liu. Spatial multi-scaled chimera states of cerebral cortex network and its inherent structure-dynamics relationship in human brain [J]. National Science Review, 2021(8): nwaa125.
- [3] 王振华, 刘宗华. 复杂网络上的部分同步化: 奇异态、遥同步与集团同步[J]. Acta Physica Sinica, 2020(69): 088902.
- [4] Zhenhua Wang, Zonghua Liu. A brief review of chimera state in empirical brain networks [J]. Frontiers in Psychology, 2020(11): 724.
- [5] Liang Cao, Zonghua Liu. How IQ depends on the running mode of brain network? [J]. Chaos, 2020(30): 073111.

教师原创命题能力也就会水涨船高。当然本文仅侧重于研究纸笔考试的试题改编技法,随着我国高中教学方式的变革,项目式学习任务的设计也显得同样重要和迫切。有兴趣的读者可参考笔者拙文《基于核心素养的物理表现性任务的设计》^[1], 试题改编与表现性任务设计是相通相融的,都应该基于培养学生核心素养,强调真实情境,侧重能力立意。

参考文献

- [1] 沈启正. 基于核心素养的物理表现性任务的设计[J]. 物理教学, 2020(7): 59—63.
- [2] 周小奋. 基于原始物理问题的试题命制及测试反馈[J]. 物理教师, 2020(10): 42—44.
- [3] 张玉峰. 物理概念学习诊断的内容框架及其命题应用[J]. 物理教学, 2021(1): 2—4.
- [4] 沈启正. 基于深度学习的物理表现性评价的若干设计原则[J]. 物理教师, 2020(8): 7—11.