

科技评论

21 世纪的物理学 ——认知的物理学

李德毅

摘要 认知物理学是用物理学的理论和方法解释人的智能,用物理机器模拟人类的思维活动,认为其依靠暴力思维,把千万年的人类认知浓缩到今天硅基的机器里面,生成人工智能。认为认知物理学突破了传统认知科学的边界,重构了人类对智能本质的底层逻辑和认知框架,物质、能量、结构和时间是人类认知也是机器认知的最基本要素,人的智能和机器智能物理同源,数学同构,操作同序,都基于熵的物理法则;激活机器的钥匙是时钟、时序和递归;智能时代的“图灵测试”将不再是主观测试。解释了基因进化和认知进化之间的尺度失配问题,把智能从长期以来人类意识的黑箱纠缠和困扰中解放出来,变得透明、物理可解释,从人类独有走向人机共生、共融、共成长。提出认知物理学是一场值得认真对待的思想革命,是 21 世纪的物理学。

关键词 尺度失配;负熵;自成长系统;认知四要素;认知模型;具身智能

物理学是研究物质及其基本结构、相互作用和运动形式的科学,其目标是探究蕴藏在自然、生命和人工系统中各种现象与效应背后的基本规律。杨振宁(1922—2025)于 1991 年在《科技导报》发表《二十世纪的物理学》一文,讨论 1905—1930 年基本物理学的 3 次观念大革命,以及 1930—1990 年包括生物物理学在内的各项物理学进展^[1]。21 世纪,随着人工智能技术的迅猛发展,认知物理学诞生并迎来发展良机,而这一点,杨振宁在展望 20 世纪的物理学时并

军事科学院系统工程研究院,北京
100091

未提及。

1 物理学新百年走向

如何用物理学的理论和方法解释生命体的新陈代谢和生老病死、解释人的智能?寻求这些现象的物理机理,让人们越来越关心生物物理学。进入 21 世纪后的最近 10 年,人工智能作为时代的新质生产力,无处不在,无时不在,其技术发展和应用如火如荼。全球发达国家奋力研发能够认知的机器。人们时而愤怒,时而焦虑,捍卫或重申那传统的边界,留恋那个我们认为存在唯一智能体——我们自己——的时代,总想说机器

不是“真正”的智能。这正是人工智能工作者长期面临的挑战。

人类作为碳基生命中的高等生物,认知是其生存和繁衍的基本活动。机器不是生命,只是机械的、物理的、电子的装置。1946 年在美国宾夕法尼亚大学诞生的世界第一台 ENIAC 通用计算机,占地 150 m²,质量 27 t,使用了 1.8 万只电子管、6000 个开关、7 万只电阻、1 万只电容器、50 万条电线,耗电量 140 kW,可进行 5000 次/s 的加法运算^[2]。那时,谁也不会认为这是一台“电脑”或者“机器人”。因此,有必要用物理学的理论和方法,解释智能,解释机器如何被激活、如何进行计算、如何

收稿日期:2026-01-23;修回日期:2026-02-19

作者简介:李德毅,教授,中国工程院院士,研究方向为计算机工程、不确定性人工智能、数据挖掘、智能驾驶、认知工程以及认知物理学等,电子邮箱:lidy@cae.cn

引用格式:李德毅. 21 世纪的物理学——认知的物理学[J]. 科技导报, 2026, 44(10): 17-22; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2026.01.00091

思维以及如何感知、认知和行动。

物理学原本是研究自然界物质基本结构及其运动规律的学科,它探索大至宇宙、小至基本粒子最原本的自然规律,属于物质科学。宇宙里有银河,银河系里有太阳,太阳系里有地球,地球上生命,生命体中包括人类,可见人类也是自然的一部分。自然界里的一切都是由物质和能量构成的。因此,人类自身也遵从自然界的这些普适规律。生物物理学最著名的教科书当数美国理论物理学家菲利普·纳尔逊(Philip Nelson)的《生物物理学:能量、信息、生命》(*Biological Physics: Energy, information, life*)^[3]。今天或许该写《生物物理学:物质、能量、结构、时间》,甚至是《认知物理学:物质、能量、结构、时间》——因为这是21世纪的物理学。有时候想,研究生物物理学的施一公,创办西湖大学,为什么不成立一个“认知物理学院”呢?

2 认知物理学的诞生

人类感知宇宙和环境中的万事万物,认识并解释它们,形成经验和知识,进而指导和支配人类行为,并且不断累积完善。对于一般寿命不到百年的个人来说,在人类这个生生不息的高级物种中的地位,实在太渺小;即使整个人类,在宇宙中的地位也实在太渺小。唯有人类自己普遍地相信,这个广宇长宙是可以被人类逐渐认知的;人类不但能认知宇宙,认知银河、太阳、地球和生命,还能认知自身,包括精神世界。

历史上3位科学巨人薛定谔(1887—1961)、图灵(1912—1954)和维纳(1894—1964)均讨论过生命的物理观和机器的生命观。1936年图灵提出图灵机模型,计算机用时钟和时序维持机器自身及产生有序事件^[4]。后来他又发出“天问”:机器能思维吗?1944年薛定谔撰写《生命是什么?》(*What is life?*)^[5],熵增和熵减都用时间来度量,用物理学解释生命的最小单元——细胞,生命进化的方向是熵减。1948年维纳撰写《控制论》(*Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine*)一书^[6],用负反馈维持系统的秩序——稳定性,让控制论成为强化化学学习的发源地^[7]。1950年图灵发表《计算机与智能》(*Computing machinery and intelligence*)一文^[8]。1950年维纳撰写《人有人的用处——控制论和社会》(*The human use of human beings: Cybernetics and society*)^[9]一书,强调人机交互。3位科学巨人是同一时代的人,可惜没有记录显示他们曾见过面、讨论过。受其影响和启发,我们拓展其学术思想,统一在熵的物理法则之上,交叉互补,与时俱进,创建了认知物理学。

和物理机器认知的速度相比,人类认知的自然进化过于缓慢。200万年前直立人走出非洲^[10],25万年前人类以狩猎和采集为生,1万年前开始定居农耕^[11],5000年前有了语言文字、文化和文明^[12],2000年前古希腊哲学的奠基人亚里士多德诞生^[13],300多年前现代物理学奠基人牛顿诞生,他于1687年发表的《自然哲学的数学

原理》(*Philosophiae naturalis principia mathematica*)为人类后来认识自然以及区分哲学、科学和数学奠定了基础^[14]。200多年前,随着纺纱机、蒸汽机等动力机器的发明,人类开始了工业革命^[15];1879年科学革命的先驱、理论物理学家爱因斯坦诞生,他于1915年提出广义相对论^[16];1912年,计算机和人工智能之父图灵诞生。人类普遍使用电子计算机还不到百年,但今天机器人和人类对话、博弈已经司空见惯。如果说,胚胎发育浓缩重演了人体组织器官漫长的自然进化过程,教育尽可能让个人能够获得人类几千年的文明和相关知识的积累,那么人工智能用物理机器模拟人类的思维活动不过百年,就能依靠暴力思维把千万年的人类认知浓缩到今天硅基的机器里面^[17],这是多么了不起、多么飞快的进步啊!

人类拥有一个非物质的精神世界,孕育了文化和文明,创造了很多人造物并置之于物理世界之中。特别是,人类发明了认知的物理机器,将人类体力和智能延伸到体外。机器具身成为真实世界的物质存在,成为人类文明的生态。这就是我们身处的智能时代,智创未来,未来已来,人类迎来百年之大变局^[18],反过来正在深刻地改变人类自身。

科学精神尊重事实,追问本质,捍卫真理。在这样的时代背景下,2000年我们在“不确定性人工智能”研究成果的基础上,提出“认知物理学”思想。历经20余年的研究与发展之后,我们总结出人类历史上近5000年、近500年

和当下正在发生的3次认知大革命,力图用自然科学探索人的主观认知奥秘,寻找人的智能和机器智能的共同底层逻辑,用物理学解释精神,解释人类认知,用物理机器来拓展人的认知。我们发现,物质、能量、结构和时间是人类认知也是机器认知的最基本的4个要素^[19]。其中,结构是寄身在不同尺度(层次)的物质物体上的主观认知,本身无量纲;我们同时指出,激活机器的钥匙是时钟、时序和递归,由此实现机器里面的物质硬构体和思维软构体的相互纠缠^[20]。我们论证了:认知机器赖负熵为生,用能量产生时序,依靠递归暴力思维,突破图灵机唯计算智能的局限,发展记忆智能和具身智能。我们用模型、场、势等经典物理学的理论与方法,完成包括概念在内的思维软构体记忆的形成和重构^[21]。我们用云模型形式化概念,证明了正态云模型表示定性概念的普遍适用性,用云变换形式化不同尺度的抽象概念,用数据场、拓扑势进行网络数据挖掘和知识发现,完成记忆的提取和调控^[22]。我们构建了4种认知模型:记忆驱动的经验模型、知识驱动的推理模型、联想驱动的创新模型、假设驱动的发现模型。它们之间的切换带有不确定性,形成认知的螺旋。当前,深度学习、模式识别和生成式大语言模型异军突起,已经取得巨大成功,但那仅仅是属于记忆驱动的经验模型。人们经常使用的记忆驱动的经验模型侧重于结构思维,即形象思维。因此,如果用机器实现这种模型,就要求机器具有的硬核是算法、算力和数据。人们不

时使用的知识驱动推理模型侧重于逻辑思维,即因果推理,但如果用机器实现这种模型,则要求机器具有的硬核是算法和算力。我们指出,难能可贵的联想驱动的创新模型和极为罕见的假设驱动的发现模型更多依赖于人的灵感和顿悟;如果用机器实现这种模型,则要求机器具有新的硬核,那就是抽象、联想、交互和涌现。我们还解释了机器认知如何像人、又如何不像人。我们指出,人的智能和机器智能,物理同源,数学同构,操作同序,都基于熵的物理法则。智能时代的“图灵测试”将不再是主观测试。智能将从长期的意识黑箱纠缠和困扰中解放出来,变得透明,变得物理可解释,从人类独有,走向人机共融^[23]。

如同构建万有引力、电磁力、强核力、弱核力的“大统一理论”是所有顶尖物理学家的梦想一样,构建认知的统一世界大模型,也许是认知科学家的梦想。这些梦想不会阻挡我们开辟各智其智、智人之智、智智与共的人工智能新方向。其中,具身智能是人工智能研究的出发点和归宿,它用千姿百态的机器替代社会更多的劳动,其成熟度与替代效率指数级提升。认知物理学力图站在薛定谔、图灵、维纳等科学巨人的肩膀上,目前的认知物理学不在于某个细节论证的完备性,而是提出一个颠覆性的研究纲领,把“认知”从心理学、哲学、神经科学等很难落地的、离散的概念性思考,升华成统一的学科,建立一种可用物理、数学、工程、技术等物质手段建立起来的研究对象,形成一套可验证、

可度量的物理统一框架,通过抽象得到结构,通过联想引发类比,通过交互形成反馈,集符号主义、连接主义和行为主义之大成,旨在研发出可交互、会学习、自成长的认知机器,和人类认知相互迭代发展。

3 认知物理学解释进化论解释不了的现象

认知物理学重新定义了“生命”“进化”和“文明”,构建了一个跨越物质科学、生命科学与社会科学的统一框架,填补了人类智能和人工智能之间“缺失的连接”,以物质、能量、结构、时间为共同基石,将“自成长系统”作为起点,推动人类社会文明5000年的累积发展和人类认知的快速变迁,提出人类文明生态变化促进人的认知。达尔文的进化论是“正在进行时”^[24],正在被认知物理学拓展至人类认知的“现在完成时”,进而解释了基因进化和认知进化之间的“尺度失配”的原因。

人类赖以生存和演化的自然生态是人类从事一切活动的基础,具有毋庸置疑的客观存在性和时间上的先在性。它是人类文明的摇篮,是人类必须与之和谐共存的根基,是物理学研究的早期对象。在自然生态的基础上,唯独人类通过文字、教育、文化、科技和信仰等共同构建了文明生态,它的存在依赖于群体之间的认同与持续实践,但也衍生出不确定性、不一致性,甚至冲突。独立个体在这2个生态中,在本能的基础上逐步形成自己的后天认知,即学习的能力,解释现象、解决问题的能力。人

人工智能是人类感知、认知并回应自然生态和文明生态的结果,是人类智能的体外延伸。认知物理学力图解释人类认知如何用物理机器实现,无处不在,无时不在,正如火如荼。

几百万年来人类在纯自然的物理世界里生存、繁衍和进化;5000年前人类发明了文字和教育,开始构建人类文明生态;经过3次大的认知革命,人的个体生命和认知就在这个文明不断跃迁的生态里诞生、成长、完善。诺贝尔奖获得者薛定谔提出,生命进化的方向是熵减,通过能量摄入,实现局部有序,而这一局部熵减过程与宇宙整体熵增趋势相对应。这一观点将热力学第二定律与生物进化论、机器智能统一起来,也将机器智能和生命智能统一起来。在此基础上,认知物理学将“自成长系统”单列出来,突破了传统生物学对生命的碳基定义,重新定义生命。所谓“自成长系统”,是指能够自我复制、自我调节、在环境中持续维持秩序的、自组织的开放系统。碳基生命是这样的系统,图灵和冯·诺依曼发明的计算机、乃至硅基的认知机器中的思维软构体,也是这样的系统。但是,硅基机器中结构的维持需要负熵,物质硬构体自身没有新陈代谢,还要老化,要依靠外部力量来维修、升级、换代。因此,机器智能出自“半生命系统”。只有软件可以自我复制和自成长,通过与外界交互,能够自组织、适应环境并持续进化。这为理解人工智能乃至未来可能的人工生命提供了理论基础。这一概念模糊了“生命”与

“非生命”的界限。这样一来,包括文字、文化、教育、人造物品、人居环境、互联网和认知机器在内的人类社会的文明生态,也能够自我复制,自我调节,在自然中持续维持自身的秩序,可视为“人类进化”的延续。这就打破了自然科学与社会科学的壁垒,为理解人类社会变迁和认知跃升提供了生物学视角。这一框架揭示了一个真理:人类的进化已从个体具身的自然进化,转向人类社会整体的文明生态进化。过去的1万年,人类身体结构几乎没有太大的变化,但生存和繁衍的环境和质量却大大提升。1920—1950年中国婴儿死亡率,即每1000个活产婴儿中在1岁前死亡约有200个,而现在下降到不足3个^[25]。可见,5000年来人类文明迅速走向创建人类生活和工作的环境,和创建更多人造物品、走向认知文明的步伐是何等之快,影响人类自身进化是何等之快。人类在生存和繁衍过程中产生的认知和智能,可以说主要不是由先天的DNA突变驱动的,而是由后天认知物理学和认知工程驱动并迭代实现的。自然进化的动因是偶发和突发,如DNA突变和思维灵感。这一观点尊重了不确定性在进化中的作用,避免了纯粹的决定论。机器认知的突破恰恰源于偶然发现,或者意外的创新触发,这些突变必须有选择机制的筛选,在物理世界得到验证,只有那些能有效降低系统熵的变异才会被保留下来。这就形成了“探索(随机扰动)+验证(选择优化)”的驱动模型。在这一意义上,人类文明的自我进化确实是生

物进化的最高形式。人类这个碳基物种不再是纯粹地依赖随机变异与自然选择的生物进化。曾经的生物进化研究聚焦DNA层面,忽视了人类社会文明生态的进化环境对人认知的影响,忽视了个体层面上人脑的后天可塑性与学习能力,忽视了群体层面上知识的扩散、传承和累积,还忽视了人类社会组织结构的群体创新。机器尤其擅长深度递归,不担心指数爆炸、穷举和试错,暴力计算是机器的强项。因此,认知物理学对人类学、社会学、经济学等学科具有重大启示意义。

4 认知物理学:认知范式的革命

认知物理学是一场值得认真对待的思想革命。长期以来物理学被认为研究的是“死”物质,而人文研究的是“灵魂”。认知物理学终于架起了一座桥梁。它告诉人们,智能不是人类某种神秘的灵性灌注,而是生命在追求有序化过程中的必然发展。结构和时间是人类认知的主观产物,把结构和时间与宇宙中存在的物质和能量并列,在人类认知史上还是第一次。认知物理学或许还过于抽象,还存在一些争议,但它代表了近年来最具原创性和整合力的思想尝试之一。它勇敢追求底层的相同逻辑和统一解释的框架;它不局限于学科的固定边界,而是致力于实现物质科学、生命科学与社会科学的交叉融合,唤醒一种久违的文明主体意识:我们不再单纯是被动演化的碳基自然生物,而是可以借助

硅基机器主动参与甚至主导自身进化的设计师。它点亮了一盏明灯——照见我们是谁,我们从何而来,以及我们将去往何方。我们可以探索未来人类社会的形态,将科学拓展到社会的政治、文化、经济等领域之中,让认知物理学成为跨学科研究的底层逻辑。在这个熵增的宇宙里,我们可以利用熵减,利用人工智能和文明生态,使得人类这个物种不只是物理的生命,更是文明的生命,让人类不再只做自然的孩子,而成为自身秩序的共建者、延续者、创造者。

认知物理学让人类有了和自然界其他高等生物的最大不同。劳动创造人类,认知成就人类。机器智能与人类智能交叉融合、协同推进。在屏幕前的阅读、思考、写作、分析、决策——这些工作机器智能已经开始部分或全部代替人类完成。而当智能机器能够承担从农作物播种收割、能源勘探生产到精密制造加工,从基础设施构建、物流配送到社会服务的各类任务时,人类满足社会整体物质总需求所需的劳动时间将会大幅压缩。到21世纪末,也许不到20%的人口从事生产劳动,就可以完全满足整个人类生存和繁衍的物质总需求。“劳动”与“生存”这两个概念被强制绑定了数千年,或将发生历史性分离,认知使得劳动不再仅是谋生手段,而有望成为自由创造和充分体现人的意志与价值的实践活动。人工智能带来的不只是生产方式的变革,更是人类存在方式的变革。人类文明生态可在宇宙中持续维持自身秩序,成为生物进化的最高形态,而个体只

是这个生态里的一分子。地球上其他高等生物并没有这样的生态,人类终将把它们越来越远地抛在后头。21世纪的物理学一定属于认知的物理学,包括认知机器在内的文明生态是人类自身认知进化的加速器,人类将更加智慧、更加自律、更加尊严、更加优雅地生活。真正的超人是那些善于发明人工智能,又清醒认识到人工智能的边界并保持自身价值和判断的人。

参考文献(References)

- [1] 杨振宁,严志雄. 二十世纪的物理学[J]. 科技导报, 1991, 9(2): 12-16.
- [2] Wikipedia contributors. ENIAC[EB/OL]. (2024-05-10) [2024-05-20]. <https://en.wikipedia.org/wiki/ENIAC>.
- [3] Nelson P C. Biological Physics: Energy, information, life[M]. New York: W. H. Freeman, 2004.
- [4] Turing A M. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem[J]. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1937, 42(2): 230-265.
- [5] Schrödinger E. What is life?[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1944.
- [6] Wiener N. Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine[M]. Cambridge (MA): MIT Press, 1948.
- [7] Sutton R S, Barto A G. Reinforcement learning: An introduction[M]. 2nd ed. Cambridge (MA): MIT Press, 2018.
- [8] Turing A M. Computing machinery and intelligence[J]. *Mind*, 1950, 59 (236): 433-460.
- [9] Wiener N. The human use of human beings: Cybernetics and society[M]. Cambridge (MA): MIT Press, 1950.
- [10] Vekua A, Lordkipanidze D, Rightmire G P, et al. A new skull of early Homo from Dmanisi, Georgia[J]. *Science*, 2002, 297(5578): 85-89.
- [11] Smith B D. The emergence of agriculture[M]. New York: Scientific American Library, 1998.
- [12] British Museum. Writing[EB/OL]. [2024-05-20]. <https://www.britishmuseum.org/>.
- [13] Shields C. Aristotle[EB/OL]. (2023-08-25)[2024-05-20]. <https://plato.stanford.edu/entries/aristotle/>.
- [14] Newton I. Philosophiae naturalis principia mathematica[M]. London: Joseph Streater, 1687.
- [15] Wikipedia contributors. Industrial revolution[EB/OL]. (2024-05-18) [2024-05-20]. https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_Revolution.
- [16] Einstein A. The foundation of the general theory of relativity[J]. *Annalen der Physik*, 1916, 49(7): 769-822.
- [17] 李德毅. 人工智能基础问题: 机器能思维吗?[J]. *智能系统学报*, 2022, 17(4): 856-858.
- [18] 李德毅. 智创未来, 未来已来[J]. *科技导报*, 2026, 44(2): 17-24.
- [19] 李德毅, 殷嘉伦, 张天雷, 等. 机器认知四要素说[J]. *中国基础科学*, 2023, 25(3): 1-10.
- [20] 李德毅, 张天雷, 韩威, 等. 认知机器人的结构和激活[J]. *智能系统学报*, 2024, 19(6): 1604-1613.
- [21] 李德毅, 杜鹤. 不确定性人工智能[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [22] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. *中国工程科学*, 2004, 6(8): 28-34.
- [23] 李德毅. 论智能的困扰和释放[J]. *智能系统学报*, 2024, 19(1): 249-257.
- [24] Darwin C. On the Origin of species [M]. London: John Murray, 1859.
- [25] 国家统计局. 2023年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2024-05-20]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.

Physics in the 21st Century—Cognitive Physics

LI Deyi

Academy of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100091, China

Abstract It is believed that cognitive physics will become the direction of the new century of physics, explaining human intelligence with the theories and methods of physics, simulating human thinking activities with physical machines, and relying on violent thinking to condense millions of years of human cognition into today's silicon-based machines to generate artificial intelligence. It is believed that cognitive physics has broken through the boundaries of traditional cognitive science, reconstructing the underlying logic and cognitive framework of human understanding of the essence of intelligence. Matter, energy, structure and time are the most fundamental elements of both human and machine cognition. Human intelligence and machine intelligence have the same physical origin, the same mathematical structure and the same operational sequence, all based on the physical law of entropy. The keys to activating the machine are the clock, timing sequence and recursion. The "Turing Test" in the intelligent era will no longer be a subjective test. It explains the scale mismatch between genetic evolution and cognitive evolution, liberating intelligence from the long-term entanglement and disturbance of the black box of human consciousness, making it transparent and physically explainable, moving from being unique to humans to symbiosis, integration and co-growth of humans and machines. Proposing that cognitive physics is an ideological revolution worthy of serious attention and represents the physics of the 21st century.

Keywords scale mismatch; negative entropy; self-growing system; the Four Elements of cognition; cognitive model; embodied intelligence ●



(责任编辑 王志敏)