中国科学报

CHINA SCIENCE DAILY

总第 9098 期　2026 年 10 月 20 日　星期二　今日 4 版

中国科学院主管　中国科学报社出版

国内统一连续出版物号 CN 11－0084　代号 1－82

主办：中国科学院　中国工程院　国家自然科学基金委员会　中国科学技术协会

听《中国科学报》　《中国科学报》官微　科学网 App　科学网官微

新浪微博 http://weibo.com/kexuebao　　科学网 www.sciencenet.cn

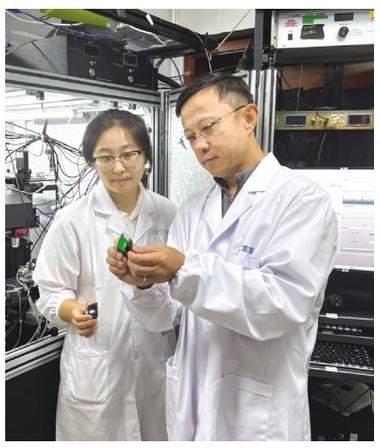
大脑是如何决策的？百年谜题获关键证据

■本报见习记者 郑浩威

100 多年前，西班牙神经学家圣地亚哥·拉蒙·卡哈尔绘制出神经元形态，确立神经元是大脑认知的基本单元，同时也留下一个未解谜题：这些如同小树般的神经细胞，究竟是靠怎样的内部运算支撑起人类灵活决策的？

长久以来，科学界习惯把神经元简化成网络中的一个“点”，却忽略了枝杈繁茂的树突蕴藏的计算潜能。中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心研究员徐宁龙团队首次在活体动物执行高级认知行为时，获得了树突参与抽象规则决策的直接实验证据。相关研究 10 月 16 日发表于《科学》。

从我国神经生理学家张香桐院士 1951 年开创性提出“顶端树突具有电兴奋性并整合突触输入”的科学猜想，到徐宁龙团队耗时近十年的科学探索，人类对大脑细胞如何思考的理解正在进入新的阶段。



徐宁龙（右）和团队成员张园在讨论实验。　受访者供图

百年未解的科学谜题

如果把神经元比作一棵树，胞体是树根，向外层层分叉的枝杈便是树突。自神经元学说建立以来，这棵“树”的枝叶到底在做什么，始终是神经科学领域一块难啃的“硬骨头”。

很长时间以来，多数脑科学模型乃至今天的人工智能（AI）架构，都把神经元处理成简单的点状节点：信号传入，加权求和，输出放电。人类认知行为则被理解为海量“点”联网运算的结果。这个简化模型有一个核心问题一直未被解答——神经元复杂的内部结构，是否参与高级认知计算。

早在 1951 年，张香桐就依据皮层电信号观测推断：伸向大脑皮层表层的顶端树突具备主动电兴奋性，能够独立整合信息。受限于当时的技术，这只是一个无法直接验证的假说。

离体实验早已证实，树突能产生独立于胞体的电信号，实现非线性放大。可一旦要在清醒、正执行复杂认知任务的活体动物身上记录树突活动，障碍就接踵而至。树突分支仅微米尺度，同步记录同一神经元的树突与胞体并区分抽象信号，工具稀缺、成功率极低。全球敢啃这块“硬骨头”的实验室屈指可数。

“认知灵活性是大脑智能的重要标志。就像威斯康星卡片分类测验，被测人员在不被告知规则时，要依靠反馈不断推断背后隐藏的逻辑，把内心推断的规则与感官信息相结合，作出选择。”徐宁龙说。这套底层运算究竟发生在神经细胞的哪一层，过去无人知晓。

团队把目光投向这片“无人区”。一只小鼠要被训练约两个月，才能熟练完成规则切换任务。随后，研究人员还要将小鼠开颅，病毒标记特定神经元，用双光子显微镜捕捉亚细胞钙信号，但成功率极低。团队成员张园接手课题后，从简单任务起步，持续迭代实验范式，前后数年打磨，才获得意外发现：树突中竟清晰编码着抽象的规则信息，与胞体记录到的感觉信号并不相同。

“能在行为过程中特异性记录，并且调控树突活动的实验，在现有文献中极为稀少，技术挑战巨大，这项研究堪称一场‘英雄式的探索’。”审稿人评价说。

研究揭示神经元内部分工

为看清树突如何参与决策，徐宁龙团队搭建了一套小鼠版“规则推理测试”。

实验中，头部固定的小鼠聆听不同频率的声音，判断后选择左或右，获取水作为奖励。关键在于，声音高低的分类边界会毫无预警地切换，小鼠只能依靠每次选择后的奖励反馈，不断推断当下隐藏的规则——同样的声音，在不同规则下必须作出相反的选择，这正是认知灵活性的体现。

研究锁定听觉皮层第五层 ET 亚型锥体神经元。这类皮层输出信号的关键细胞，已由团队前期实验证实直接参与决策行为。借助亚细胞分辨率的双光子成像，研究人员同时记录同一个神经元的顶端树突与深层胞体。

实验结果给出了清晰答案。同一个神经元内部出现明确分工：顶端树突主要编码小鼠推断出的抽象规则这一内在认知变量，胞体更多表征外界听觉感觉输入。两类信号在神经元内部发生非线性整合，生成决策输出，驱动行为选择。

“不是简单的 1+1，两种信号共同作用时，会产生远超线性求和的输出。”徐宁龙说。为验证树突不是旁观者，团队用光遗传学技术激活 SST 中间神经元，特异性抑制顶端树突。结果，胞体的决策选择信号显著减弱，说明树突的编码活动是灵活决策输出必不可少的一环。

这一发现更新了主流认知：高级认知并非只是大量“点状神经元”联网计算，单个神经元内部的不同区室即可分工处理不同类型信息，独立完成非线性认知计算。

张园回忆，最初看到树突与胞体信号不一致时，团队十分意外，因为此前不涉及规则推理的实验里，二者往往趋于一致。多轮重复验证后，团队确认这一发现真实可靠。

这项研究结果把经典的树突双区室整合模型，从感知、运动处理拓展到抽象规则类高级认知，接续了张香桐 70 多年前的科学猜想。从假说到离体现象，再到活体认知行为下的直接证据，几代中国科研人员终于补上一块重要的科学拼图。

对 AI 发展和脑部疾病治疗的启示

大脑是一台极度节能的“生物计算机”。反观主流 AI 大模型，把每个计算单元简化为点状节点，靠海量参数与深层网络堆叠能力，消耗巨量训练数据与算力，还容易出现灾难性遗忘、灵活性不足等问题。徐宁龙团队的这项发现，为 AI 底层架构提供了来自生物大脑的参考。

“如果借鉴树突多区室架构，让每个基础计算单元内部拥有多个信息处理分区，不同输入可在不同区室隔离处理。”徐宁龙解释，单个单元计算能力变强，不必依赖极深的网络，既能降低能耗，也可实现不同信息互不覆盖，有望缓解灾难性遗忘。未来，类脑 AI 或走向更低能耗、小样本下更灵活的推理，甚至赋能具身智能。不过，研究团队表示，从生物学发现到工程落地，仍有大量跨学科工作要做。

该研究也为精神认知障碍疾病的干预提供了新思路。强迫症、成瘾类病症的典型特征正是认知灵活性受损，患者接收的感官输入与常人无异，但大脑内部对环境的推断、信念发生扭曲。这种异常很可能源于树突承载的内在认知信号与胞体感觉信号的整合紊乱。

临床上，经颅磁刺激、颅电刺激的作用靶点恰好在大脑皮层表层——顶端树突富集之处，但疗效通常不稳定。该研究的解释是，仅刺激表层树突，不足以产生有效的运算输出，需要兼顾树突与胞体的协同激活，树突亚细胞区室有潜力成为认知类精神疾病的全新干预靶点。

据了解，未来张园会进一步聚焦树突整合异常为何造成认知缺陷这一问题展开研究。徐宁龙实验室还将在绒猴等灵长类动物身上开展跨物种实验，并研究树突计算如何在大规模脑网络中流动，同时与 AI 研究者合作，探索生物机制向类脑算法转化的路径。

相关论文信息：

https://doi.org/10.1126/science.adz5323

研究实现量子网络跨节点散粒噪声极限相位锁定

本报讯（记者王敏）近日，中国科学技术大学潘建伟院士、张强教授等与济南量子技术研究院陈玖朋副研究员等合作，提出一种“多波长联合相位锁定”架构，并结合贝叶斯相位估计，实现了跨节点、达到散粒噪声极限的高精度相位锁定，为可扩展量子网络节点的远程互连提供了关键技术支撑。近日，相关成果发表于《物理评论快报》。

在构建远程量子纠缠时，基于散射光子的单光子干涉方案只需探测单个光子，就能消除路径可分辨性并建立纠缠。相比需要两个光子符合测量的方案，它更能抵抗信道损耗。但这条路有个核心瓶颈：跨节点的高精度相位锁定。一方面，散射光子会“继承”操控激光、变频泵浦光以及长光纤一路累积的复合相位，必须对整条链路统一追踪；另一方面，用来追踪相位的参考光必须非常弱，否则会干扰量子存储态。可光越弱，光子到达的随机涨落越明显。这就是散粒噪声，会限制相位估计的速度和精度。达到散粒噪声极限，意味着在这样弱的光强下，测量精度已经逼近理论允许的最好水平。

针对这些难题，团队基于两个远程单离子节点，搭建了“时分－波分”多波长联合相位演化追踪架构，并发展了实时贝叶斯相位估计技术。贝叶斯估计就像结合先验信息与不断出现的新线索，在极低信噪比下最大化提取有效信息并实时修正判断，从而从很弱的光信号中精确推算出相位变化。在时间上，团队让 729 纳米（nm）与 854nm 操控光通过和频产生 393nm 参考光脉冲，并与离子散射光交替发射；参考光复用操控光的初相位，经历相同的传输信道，还在 527nm 泵浦下进行量子频率转换，转到 1550nm 通信波段，从而原位追踪整个系统的复合相位演化。在频率上，引入一束失谐约 2nm 的 1548nm 连续弱参考光，实时捕捉并补偿光纤链路的快速抖动。针对微弱参考光带来的统计涨落，团队用 FPGA（现场可编程门阵列）实时运行贝叶斯估计，使动态相位解调精度达到散粒噪声极限。

基于上述突破，系统在极低参考光强下，实现了 10 公里与 100 公里光纤链路上的跨节点高精度相位锁定。远程单光子干涉可见度均保持在 97% 以上，纠缠字称对比度超过 85%。这为构建可扩展量子中继、迈向未来量子网络奠定了技术基础。

相关论文信息：

https://doi.org/10.1103/cxs1-3pzf

科学家为正在瓦解的人马座矮星系“画像”

本报讯（记者甘晓）一个正在被银河系引力撕裂的矮星系，曾经是什么模样？中国科学院国家天文台联合紫金山天文台等单位的科研团队，通过分析人马座星流中恒星的化学组成与运动特征，并结合数值模拟，为人马座矮星系瓦解前曾拥有旋转盘提供了新证据。近日，相关研究成果发表于《自然－天文学》。

“人马座星流让我们有机会复原原始星系的部分结构，并将其与现存矮星系进行比较。”中国科学院院士、中国科学院国家天文台研究员赵刚表示，“这样的比较有助于我们更好地理解矮星系是如何形成和演化的。”

人马座矮星系正受到银河系引力的潮汐作用，部分恒星被逐渐剥离，在轨道上形成绵延的星流。然而，内部结构不同的星系瓦解后，可能留下相似的星流，因此对于人马座矮星系瓦解前是否具有旋转盘一直存在争论。

研究团队综合利用郭守敬望远镜（LAMOST）、斯隆数字巡天（SDSS）以及欧洲空间局盖亚（Gaia）卫星的观测数据，对人马座星流的前导臂和后随臂展开分析。

研究发现，在星流的前导臂和后随臂中，靠近银河系中心一侧的恒星金属丰度较高，远离一侧则相对较低，恒星金属丰度与角动量存在相关性。

为检验这一解释，研究团队开展 N 体数值模拟，追踪不同结构的前身星系在银河系潮汐作用下失去恒星、形成星流的过程。他们比较了盘状、椭球状和具有旋转运动的椭球状 3 类星系模型，设置两种径向金属丰度分布：一种随半径增大持续下降，另一种先升高后降低。结果表明，只有具有“Λ形”径向金属丰度分布的旋转盘模型，能够同时重现前导臂和后随臂中观测到的金属丰度与角动量相关性。

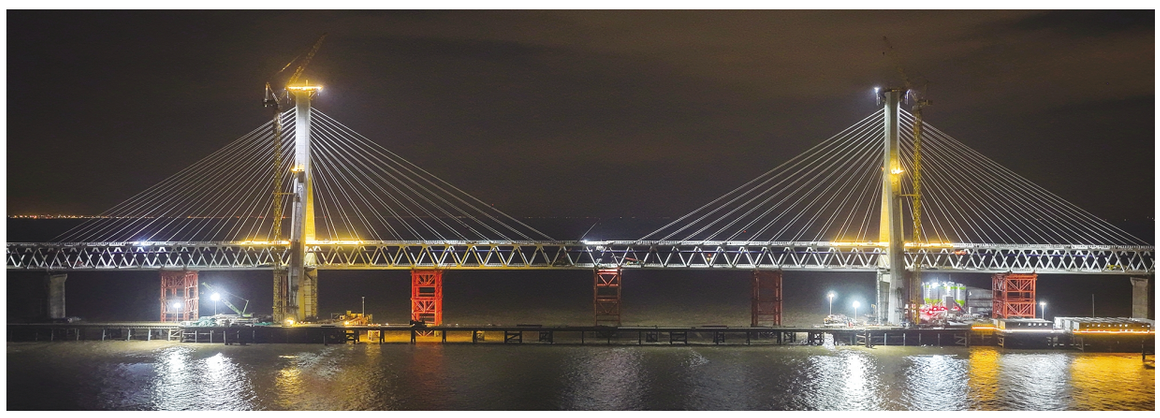
模拟结果还揭示，前导臂主要对应前身星系靠外侧的恒星，后随臂则提供更靠近中心区域的信息。结合两条星流臂，研究人员得以约束原始星系特殊的金属丰度分布。

为了解这一特殊分布是否也存在于今天仍然存活的矮星系中，研究团队利用 SDSS 的阿帕奇点天文台（MaNGA）巡天数据，分析其他矮星系中恒星金属丰度随半径的变化。在符合筛选条件的 217 个矮星系中，研究人员找到 3 个具有明确类似分布特征的例子，说明该特征虽不常见但也并非人马座矮星系独有。此前已有研究发现，银河系也具有类似的径向金属丰度分布，不过这些相似性是否源于共同的物理过程仍有待研究。

研究人员认为，复原已瓦解矮星系的部分原始属性，能够将其纳入与现存矮星系的对比研究，弥补仅研究幸存星系的不足。

相关论文信息：

https://doi.org/10.1038/s41550-026-02996-2



近日，新建南通至宁波高速铁路杭州湾跨海铁路大桥南航道桥钢桁梁成功合龙，为后续斜拉索张拉调索、桥面系附属工程施工奠定基础。这也是该桥 3 座航道桥中首座合龙的桥梁。杭州湾跨海铁路大桥全长 29.2 公里，设计时速 350 公里，是目前在建的世界最长、建设标准最高的集群式跨海铁路桥梁。由中交二航局承建的南航道桥位于杭州湾中央海域，全长 814.5 米，采用钢桁结合梁斜拉桥结构，主跨 364 米，可满足 3000 吨级船舶通航。

图为杭州湾跨海铁路大桥南航道桥。　**本报记者李思辉 通讯员肖苡轲报道 中交二航局供图**

AI 赋能之下需要更多一流数学家

■励建书

最近一段时间，OpenAI 批量产出数学成果的事件，引出各种各样的想法和说法。我觉得，这是一个激动人心的时代。在这样一个变革的时代，肯定会有一段时期的迷茫和不确定，但这往往意味着一个新时代正在酝酿，即将到来。

作为一名数学工作者和数学机构负责人，我非常期待这样一个时代的到来。

历史上，数学曾经历过几次比较重要的变革。比如，在微积分被发明出来之前，欧洲的数学家计算一些关于曲线的量或几何体的体积等，相当于今天写一篇论文。而当牛顿和莱布尼茨发明微积分后，一切都改变了。以前可以作为研究论文发表的内容，如今成了本科生的日常作业。那么，数学和数学研究是不是消失了？恰恰相反。有了微积分后，数学和数学家反而得到了赋能，并诞生了现代数学，如微分几何、调和分析等，整个数学的“景观”都改变了。

那是一个激动人心的场景，我认为现在也面临着类似的情况。

数学正在发生的两大巨变

在人工智能（AI）的助力下，有两方面正在发生巨大变化。

首先，数学的目的是什么？历史上有很多数学难题，有些以猜想的形式存在。破解这些难题和猜想往往要经过几年、几十年甚至上百年，非常不容易，至今仍有很多著名的数学问题没有解决。当把时间和精力放在这上面的时候，我们关注的往往是攻克这个问题、爬上山顶的过程。一旦爬上山顶，就会觉得这是一个伟大的成就。但我们其实还有另一个且更重要的目的：爬上山顶后，去看更美丽的风景，去发现更多的数学。

现在有了 AI 的强大助力，这件事成为可能——登上山顶，会看到更加璀璨、浩瀚的数学天空。

励建书（右）与王坚对谈后握手合影。　**之江实验室供图**

由此，数学研究的范式可能会改变。当目前已知的一些问题被攻克后，有没有可能对整个数学学科进行整合和重新简化？1900 年前后，以希尔伯特为代表的数学家大多是全才，了解数学的各个领域。但从 20 世纪初开始，尤其在今天，世界上几乎没有一位数学家可以掌握数学的每一个方向、每一个分支，因为学科体系实在太庞大了。如今，有没有可能借助 AI 的蓬勃发展，完成这种整合和重新简化？

“简化”不是内容减少了，而是对问题的理解变得更透彻，形成更深刻的认识。这也是华罗庚先生说的，读书要“从薄到厚，再从厚到薄”。以前，数学家不可能掌握全部的数学知识，所以要做这样的整合和综合工作比较难。但这对 AI 来讲，根本不是问题。凭借 AI 的知识与信息赋能，数学家是否可以发展出新的数学来？想到这一点，我就特别激动。

其次，也是当今社会及科学界，尤其是数学界比较关心的问题：未来需要什么样的数学家？在我看来，AI 为此作出了十分有益、正向且良性的推动。未来，单纯为发表论文而开展的研究，其价值与必要性将大幅下降。个体原创性，即科研中的原创能力与创造力变得愈发重要。在 AI 的赋能下，研究需要更高层次的数学思维与思考，因此对一流数学家的需求会大幅增加。

从未来的学生培养、未来数学家的成长这个角度看，我们的确处于一个新阶段，会发生一些根本性的变化：只在前人的基础上往前走，只需一步步改进的工作，就可以交给 AI。所以，课程设置、教学范式、培养方案等大量的改革，以及太多的工作需要我们这一代人来完成。

当然，面对同一件事，不同的人会有截然不同的看法。如果我花 10 年时间研究的一个问题，却被 AI 解决了，自然会有失落感。但是，当看向未来、看向新时代下新的数学，我不但没有失落感，反而感到非常振奋。因为我相信，当我们越过这些山巅，看到一个全新的世界后，一个激动人心的数学新时代将会到来。

接下来怎么办

接下来，我们要问的就是，“怎么办？我们应该做些什么”。

面对一个全新的世界，我认为需要建立一个平台或合作机制，它必须是完全开放的，需要众多学术机构和个人共同参与建设——无论是研发“数学专用”或是“科学专用”的模型，还是在此基础上实现数学、物理等学科的交叉融合与认知跃升，都离不开协同攻关。

当下，全球有不少独立数学家及其他学科学者都在采用一种研究路径：借助当前全球性能最强的大模型辅助科研，例如利用 OpenAI 已开源或尚未公开的模型开展这类研究工作。这样做虽然效率很高，但我觉得，这不足以解决我们真正要面对的问题。　**（下转第 2 版）**

日本将向火星最大卫星火卫一发射探测器

寰球眼

本报讯 10 月 20 日，火星卫星探测器 MMX 将从日本种子岛宇宙中心发射升空，飞向火星两颗卫星中较大的那颗——火卫一。这项任务的目标是带回火卫一样本，有望最终揭示火卫一及其李生兄弟火卫二的起源。

如果一切按计划进行，MMX 预计于 2027 年 8 月抵达火星附近，并进入一条与火卫一保持并行的轨道，以便绘制出火卫一详细的表面地图。在轨飞行期间，MMX 还将对火卫二表面开展观测。

一旦地图绘制得足够完整，日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）的工作人员将依托该地图，为 MMX 选定火卫一着陆点。在一至两次短暂着陆过程中，它将执行两项任务：投放一辆名为 IDEFIX 的小型漫游车，并采集样本。这是人类首次将漫游车部署在如此小的天体上，因此除了开展科学观测外，其另一项重要任务就是验证轮式漫游车能否在低重力环境下正常运行。

采集样本是此次任务最重要的部分。MMX 配备了两套不同的采样装置，一套向火卫一表面喷射气体，将尘埃和碎石吹入采样容器中；另一套将一个空心圆柱体打入地下，从数厘米深处采集样本。采样完成后，样本将被存放在航天器内部，预计于 2031 年返回地球。

一旦样本抵达地球，地面科学家将对其展开分析，最终有望解开火卫一和火卫二的形成之谜。一个多世纪以来，研究人员一直争论这两颗卫星究竟是被火星捕获的小行星，还是如同月球一般，由天体撞击事件形成。乍看之下，它们的形状与表面特征和小行星相似，但它们沿火星赤道运行的圆形轨道，更支持撞击假说。

这项研究还有助于还原数十亿年前这些奇特卫星形成时太阳系的图景。“答案将有助于我们了解那个早期时代，当时地球和其他类地行星可能正在获取大量水分和有机化合物。”参与 MMX 任务的美国国家航空航天局（NASA）团队成员 Tom Statler 在一份声明中表示。

如果足够幸运，火卫一样本甚至可能含有来自火星本体的尘埃和碎片。火星遭受撞击时，这些物质可能被抛入太空，随后在火卫一表面聚集并保存了数亿年。这意味着这些样本不仅能够揭示火卫一和火卫二的演化历史，也可能为火星研究提供线索。　**（李木子）**