

· 科技评述 ·

## Science 2020 年十大科学突破解读

[编者按] *Science* 杂志每年会在年底评选出当年十大科学突破。2020 年 12 月 17 日, *Science* 杂志公布了其评选出的 2020 年十大科学突破。为了让广大读者更深入地了解这十大科学突破的科学价值, 本刊特邀各领域著名科学家分别对其中自然科学相关突破进行解读, 以激发科研人员的创新思维, 促进学术交流。

### 1 新冠疫苗点亮希望之光

2019 年末发现的新型冠状病毒以惊人的速度席卷全球。当全世界陷入恐慌之时, 2020 年 1 月 12 日, 中国科学家向世界公布了新冠病毒的基因组, 为全世界科学家寻找应对和治愈新冠肺炎疫情奠定了基础, 研制新冠疫苗的工作也拉开了序幕。此后, 多名科学家纷纷投身于新冠肺炎疫苗的研制工作。截至 2020 年 12 月 10 日, 全球有 162 种候选疫苗正处于研发阶段, 其中 52 种候选疫苗已经进行临床试验, 有些疫苗已经公布了三期临床试验的结果。此外, 今年与新冠病毒相关的研究论文激增。截至 12 月中旬, 在同行评审期刊上发表的论文超过 20 万篇, 而在非同行评审期刊上发表的文章更多。

全球各国仍在为遏制新冠肺炎疫情而努力, 超数百万条鲜活生命的离开也凸显了人类的脆弱性。同时也警醒我们, 只有齐心协力, 科学才能够发挥出最大作用。

英国惠康基金会主席、前牛津大学热带病学教授杰里米法拉说: “我希望人类在凝视深渊后会变得更加聪明, 意识到人类是多么的脆弱, 这也将激励整整一代人投身科学事业。”



图 1 新冠疫苗点亮希望之光(图片来源: *Science* 官网)

#### 专家点评:



**夏宁邵** 教授, 厦门大学公共卫生学院院长、分子疫苗学和分子诊断学国家重点实验室主任、国家传染病诊断试剂与疫苗工程技术研究中心主任。研制出全球首个戊肝疫苗、首个国产宫颈癌疫苗, 在 *The New England Journal of Medicine*、*Lancet*、*Science Translational Medicine*、*Nature Microbiology*、*Cell Host & Microbe* 等高水平期刊发表论文 20 余篇, 获国家技术发明奖二等奖、国家科技进步奖二等奖, 入选中国医学科学院学部委员、*Nature Biotechnology* 全球转化研究者 TOP20。



**张天英** 博士, 厦门大学公共卫生学院助理教授, 专注于乙型肝炎病毒、新型冠状病毒等人类病原体的治疗靶标、抗体和疫苗相关基础与转化研究, 以第一或通讯作者在 *Gut*、*Cell Research*、*Nature Communications* 等刊物发表研究论文 10 余篇, 获中、美、欧等专利授权 10 余项。

由新型冠状病毒(SARS-CoV-2)感染引起的 2019 冠状病毒病(COVID-19)全球大流行对人类社会造成巨大影响。截至 2021 年 4 月 2 日, 全球已确诊 COVID-19 病例超过 1.3 亿, 造成约 280 万人死亡。史无前例的公共卫生负担迫使人类迅速做出反应, 一方面, 非药物干预作为构建病毒防御的传统策略在我国发挥了巨大作用, 强有力的防控措施迅速将疫情的威胁降至最低, 让人民群众的生活回归平静; 另一方面, 疫苗作为控制传染病最经济有效的手段, 寄托着人们彻底消灭疫情的愿景, 疫苗研发在第一时间被作为战略性工作紧急开展。“以创纪录的速度开发和测试急需的新冠疫苗接种”被选为 *Science* 杂志 2020 年十大科学突破之首。

多种技术路线并行, 多单位同步研发是新冠疫苗科研攻关的一大特点。根据 WHO 的汇总数据, 目前共有超过 200 项候选疫苗研发正在进行, 其中超过 80 项已进入临床试验阶段。得益于对基础研究的长期投入和创新技术的不断积累, 之前鲜有应

用的核酸疫苗、病毒载体疫苗都在新冠疫苗竞赛中走到了前列。数据显示,进入临床阶段的候选疫苗中,近一半是核酸疫苗或病毒载体疫苗等新型疫苗,在疫情面前,人类的科研积累与潜力被充分释放。

在“饱和式”研发的大背景下,新冠疫苗的研发速度同样史无前例。众所周知,疫苗的研发不仅是产品走出实验室的过程,在人群中的临床试验往往是疫苗开发中最复杂与限速的步骤。疫苗上市前通常要经历 I~III 期临床试验,对产品的安全性、免疫原性以及有效性进行验证,以获取充分的数据证明疫苗在足够安全的同时能在机体内高效诱导免疫应答,最终达到避免机体发病或感染的目的。回顾人类历史,疫苗的研发周期通常以十年为单位,即使是既往研发速度最快的麻疹疫苗,也花费了十年时间。而在新冠肺炎疫情面前,政府、科研单位、企业和审评审批机构携手共进、协同创新的应急研发组织模式,使得新冠疫苗研发的速度、成功率以及产品可及性都得到了保障。自新冠病毒被发现到疫苗获准上市或紧急使用,仅历经不到一年。如此迅速的研发过程,新冠疫苗无愧为疫苗史、乃至科学史上的丰碑。

我国在新冠疫苗研发上同样具有数量多、速度快的特点。灭活疫苗、腺病毒载体疫苗、蛋白质亚单位疫苗、核酸疫苗、鼻喷流感病毒载体疫苗五条技术路线同步推进,我国在新冠疫苗攻关上实现了新老技术的“饱和式”研发。截至目前,我国已有 5 款新冠疫苗附条件上市或紧急使用,在研发速度上也保持了世界第一流水准。

在新冠疫苗研发迅速取得阶段性重大成功之后,全球疫情防控仍面临挑战。首先,短期内疫苗的产能是在全球构建有效免疫屏障的主要挑战;目前获准使用的疫苗多采用多剂免疫程序,多次间隔接种对疫苗的大规模快速覆盖与生产都造成了巨大挑战,单剂次、具有高强度保护效果的疫苗或可对疫情紧急防控带来较大助益。其次,疫苗分配中难以实现的公平性也成为横亘在全球防控中的一大阻碍。数据显示,目前已有超过 94% 的高收入国家已启动疫苗接种,但在低收入国家中,这一数字仅为 14%;如何实现疫苗的公平发放,是构建全球免疫屏障需解决的一大难题。第三,在疫情仍在全球肆虐之时,突变毒株为扑灭疫情蒙上了一层阴影。目前南非突变株(B. 1. 351)及巴西突变株(P. 1)是主要的免疫逃逸毒株,目前数据均表明这两种毒株会对现有疫苗的保护效果造成影响;阿斯利康疫苗以及 Novavax 疫苗在南非的临床试验结果显示,这两种

疫苗在 B. 1. 351 肆虐的南非均未达到令人满意的保护效果。对于提高疫苗保护广谱性、便捷性的新疫苗或疫苗免疫策略的研究,是接下来新冠疫苗研究的重中之重。与之同等重要的是,继续密切追踪各类疫苗接种后的中长期安全性和有效性。

总之,新冠疫苗研发取得了史无前例的巨大成就,我国也在其中贡献了不可或缺的“中国力量”。在疫苗构建起全球免疫屏障的道路上,仍有待全人类共同努力,以最终摆脱新冠病毒的影响,让世界人民的生活回归平静。

## 2 CRISPR 首次成功治愈两种遗传性血液病

2012 年,颠覆性的基因编辑工具 CRISPR 横空出世,它赋予研究人员编辑农作物和动物的强大力量,为科学研究和生物医学领域带来新一轮革命,成为 *Science* 杂志 2015 年十大科学突破之一,并摘得今年诺贝尔化学奖的桂冠。2020 年,这一“基因魔剪”再次向世界展示了其“魔力”:首次成功治愈  $\beta$  地中海贫血和镰刀型细胞贫血症这两种遗传性血液病。

为治疗三名镰状细胞病患者,研究人员从每名病人身上采集了不成熟的血细胞——血干细胞,然后用 CRISPR 靶向沉默一个“关闭”开关——这个开关在成人体内会停止胎儿形态血红蛋白的产生,而这种血红蛋白可对抗镰状突变的影响。在病人接受化疗清除病血干细胞后,经过 CRISPR 处理过的细胞被重新注入患者体内。

开展试验的两家公司 12 月报告称,这些患者 17 个月前接受治疗,现在正产生大量胎儿血红蛋白。此外,这些公司为 7 名正常输血治疗  $\beta$  地中海贫血的患者提供这种治疗后,这些病患就不需要输血了。研究人员指出,这种新疗法可与向干细胞中添加血红蛋白 DNA 治疗这两种疾病的基因疗法相媲美。



图 2 镰贫患者经过 CRISPR 基因治疗后红细胞形态开始恢复正常(图片来源:Science 官网)

## 专家点评:



刘明耀 华东师范大学生命医学研究所所长,上海市调控生物学重点实验室主任,曾任华东师范大学生命科学学院院长。国家首批特聘专家教授,教育部创新团队带头人,获得国家科学技术进步奖一等奖,上海市科学技术进步奖一等奖,上海市白玉兰奖。曾主持或参与国家或省部级重点项目 10 余项、国家“973”计划、科技部重点研发计划首席科学家。已在 *Science*、*Nature*、*Nature Medicine*、*Nature Biotechnology* 等国际学术刊物上发表 SCI 论文 350 多篇。申请专利 100 多项,获得授权专利 40 多项。

*Science* 杂志 2020 年度世界十大科学突破于近日揭晓,凭借“首次成功治愈两种遗传性血液病”(图 2),CRISPR 技术作为亚军第四次跻身十大科学突破,使该技术继 2020 年 10 月获得诺贝尔化学奖后,再次成为全球关注的焦点。CRISPR 技术是 2012 年 Emmanuelle Charpentier 和 Jennifer Doudna 率先从细菌和古细菌的获得性免疫防疫机制中开发出来的基因编辑技术。通过可人工设计的单一向导 RNA (single guide RNA, sgRNA) 将核酸内切酶 Cas9 蛋白定位到特定的 DNA 序列进行切割产生双链断裂,CRISPR 技术凭借极高的基因编辑效率、灵活性和可操作性被评为 2013 年十大科技突破。随后,该技术再次展现强大功能,实现细胞内 62 个位点的精准改变、在蚊子中产生了基因驱动效应以及首次编辑了人类胚胎 DNA,这些应用使 CRISPR 荣膺 2015 年 *Science* 杂志十大年度突破之首的称号。两年后,通过将胞嘧啶或腺嘌呤脱氨酶与突变的 Cas9 蛋白融合形成的碱基编辑技术被评为 2017 年十大科技突破,该技术无需产生 DNA 双链断裂而直接通过碱基脱氨反应实现碱基的精确高效转换,在遗传疾病治疗等领域展现了巨大的潜力。

而这一次 CRISPR 技术更是成功地应用于临床研究,攻克了两种相关的血液遗传病:β 地中海贫血(β 地贫)与镰刀状贫血(镰贫)。在致病机理上这两种疾病都是由于编码 β 珠蛋白的基因发生突变而导致贫血症状。由于遗传突变,β 地贫患者无法表达或者只能产生少量的 β 珠蛋白,导致没有足够的 β 珠蛋白与 α 珠蛋白结合形成正常的成人血红蛋白(HbA)。患者一方面表现为由血红蛋白不足而导致的贫血,另一方面由于过量的 α 珠蛋白堆积产生氧化毒性,造成溶血或红细胞发育不成熟;镰贫患者的 β 珠蛋白 6 号位的谷氨酸突变为缬氨酸,突变的 β 珠蛋白不仅会导致溶血,还会发生多聚现象,造成红

细胞变为镰刀型,异形红细胞会进一步导致血管堵塞、急性胸痛等症状。在世界范围内,目前约有 8000 万 β 地贫,4300 万镰贫携带者,而在我国广东、广西地区,β 地贫的携带率分别高达 2.54% 与 6.43%。而目前唯一的常规疗法是进行规律输血结合充分除铁。在我国,由于家庭经济状况等原因,许多患者无法坚持规律治疗导致各种并发症甚至夭折。随着对两种疾病的深入认识,研究发现部分 β 地贫或镰贫的纯合携带者并没有表现出明显的症状,而他们血液中胎儿血红蛋白(HbF)的含量却大大高于常人。与 HbA 不同,HbF 由 γ 珠蛋白与 α 珠蛋白组成。正常人的 γ 珠蛋白基因在出生后不久就会被 BCL11A 转录抑制因子复合物沉默。而上述无症状患者由于基因突变,在出生后体内 γ 珠蛋白始终保持着高表达,这项发现暗示通过操纵造血干细胞的基因组,重新激活 γ 珠蛋白或可缓解甚至完全治愈 β 地贫和镰贫患者。目前科学家已经发现多个能够重新开启 γ 珠蛋白表达的基因调控区域。而 CRISPR 技术的出现正好给了研究人员一个强有力的基因编辑工具。本次临床试验中,CRISPR 靶向的调控区域为转录抑制因子 BCL11A 的红系增强子位点,对于该位点的编辑能够特异性地关闭 BCL11A 在红系细胞中的表达,从而阻止其对 γ 珠蛋白的沉默。在通过单采获得患者的造血干细胞后,科学家们在体外对细胞进行了基因编辑,然后重新回输至患者体内。上述研究已于 2020 年 12 月 5 日在线发表在 *The New England Journal of Medicine*。截至 *Science* 杂志发文,β 地贫患者与镰贫患者已经分别完成造血干细胞回输 22 个月与 17 个月。期间两位患者虽然经历过一些与移植相关的不良反应,但最后都已缓解。目前,他们均已脱离输血依赖,可以说在表型上已经被治愈。

从诞生之初学界就对 CRISPR 保持着很高的关注度,同时也对她寄予了厚望,希望能够通过这项技术实现对于遗传疾病的基因治疗从而造福人类。一般来说药物的研发需要一段漫长的岁月,十年、二十年甚至更长。而 CRISPR 从诞生到临床试验成功仅仅用了 8 年时间,这项速度在医学发展史上是相当惊人的,甚至可以说是绝无仅有的,足以显示出这项技术的强大和特殊。另一方面,此次试验的成功也证明了该技术在临床上的可行性与可靠性,为其在其他疾病的临床运用打下了基础,具有重要的参考价值。所以“CRISPR 治愈两种血液遗传疾病”也就理所当然再次入围了 2020 年的十大年度突

破。就目前的病例数据来看,还有一些医学问题有待回答,特别是长期的安全性和有效性。而 BCL11A 位点是否适合所有的  $\beta$  地贫或是镰贫患者仍然需要更多的试验者数据以及更长时间的临床观察。所以相信科学界会对后续结果保持时刻的关注。

在 CRISPR 诞生至今的 8 年里,我国的基因编辑技术也取得了长足的进步。在动物模型构建领域,我国率先构建了 CRISPR 基因编辑大鼠、猪、基因工程猴等世界领先的模式动物。在植物育种领域也颇有建树,首次利用 CRISPR 获得了白化水稻;在小麦、水稻和玉米中进行单碱基编辑等工作。在临床研究方面,2019 年我国科学家邓宏魁、陈虎、吴昊同样通过 CRISPR 技术对造血干细胞(CCR5 基因)的编辑,成功治疗了一位罹患 HIV 与急性淋巴细胞白血病的患者,初步证明了基因编辑造血干细胞的安全性与可行性,并为未来艾滋病的治疗做了初步的探索,受到了学界广泛的关注与正面的评价。2020 年 7 月,湘雅医学院和华东师范大学团队在中国报道用 CRISPR 技术治疗 2 例中国儿童地贫病人,包括世界首例重度地贫患者(beta0/beta0),并在短期内摆脱了输血依赖。不过我国在基因编辑领域上的原创性成果与美国还存在不少差距,造成这种差距的原因有很多。总体来说我们还需要加大基础科研领域的投入,同时给予科研人员足够的时间与信任,在临床上,鼓励对源头科学问题进行深入探索。虽然 CRISPR 技术从机理大致明确到成药只用了 8 年时间,但 CRISPR 结构首次被报道却可以追溯到 1987 年,在之后的 25 年里,汇聚了生态学、微生物学、结构生物学、生化分子学、生物信息学等众多领域杰出科研人员的不懈努力,才慢慢抽丝剥茧获得 Cas9 如何切割 DNA 的答案。

总体来说,CRISPR 技术基因编辑治疗的成功具有划时代的意义。这是人类首次通过编辑基因组达到治疗疾病的目的。它标志着人类对基因组操控能力上升到了一个新的台阶,而在这之后更是隐藏着无限的可能。从技术层面上来说,以碱基编辑器为代表的 CRISPR 衍生技术在遗传疾病治疗等方面也有独特优势;从治疗的目标疾病来看, $\beta$  地贫与镰贫只是一个开始,很多遗传疾病或者如心血管疾病,帕金森病以及癌症等常见病也有望很快成为 CRISPR 技术突破的新方向。

### 3 全球变暖趋势日益明晰

40 多年前,在美国马萨诸塞州的伍兹霍尔,全球知名的气候学家聚在一起。他们讨论了一个重要而简单的问题:如果人类不断排放温室气体,地球将会变得有多热?根据基本的气候模式,他们给出了这样的答案:如果大气中的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)比工业化前的水平增加一倍,地球表面气温将会增加 1.5~4.5℃。这个被称作气候敏感性的指标范围宽泛,低值 1.5℃意味着变暖的影响不大,而高值 4.5℃可能引起巨大的灾难。

为了缩小气候敏感性的范围,科学界花费了数十年的时间。2020 年,这一领域的研究终于取得了突破,科学家能够在多项证据链基础上将气候敏感性的范围缩小到 2.6~3.9℃之间。这些证据中一个非常大的挑战是了解云对全球气温的影响:如何捕获或反射热量?根据云的厚度、位置和组成,云可以放大或抑制变暖。现在,在卫星证据的支持下,高分辨的云模式表明:全球变暖使得可以遮光的低云变得稀薄了。更热的空气使得这些云变干,并抑制了驱动云形成的湍流。

这一对气候敏感性更加清晰的认识结论将会促使社会开展应对全球气候变化的行动。持续的变暖会淹没沿海城市,加剧极端的热浪,并使数百万人流离失所。除非对气候变化采取更积极的行动,否则人类排放的温室气体可能会在 2060 年达到工业化前的 2 倍,并锁定可预见的变暖。



图 3 云不再被认为能显著抑制全球变暖  
(图片来源:Science 官网)

## 专家点评:



孙颖 博士,研究员,国家气候中心首席科学家。国家杰出青年科学基金获得者,国家百千万人才工程“有突出贡献中青年专家”。IPCC 第六次评估报告主要作者。主要从事气候变化研究,包括温室气体排放等人类活动对气候变化的影响,重大极端事件的检测归因等。曾获得世界气象组织青年科学家研究奖等。

关于全球气候敏感性的研究被选为 2020 年十大科学突破并不意外。地球的全球“气候敏感性”是衡量地球气候对温室气体排放等人类活动敏感性的基本度量指标,一般指大气中二氧化碳( $\text{CO}_2$ )浓度持续增加达到 2 倍时的辐射强度所产生的全球平均温度变化。但对于这样一个重要的指标,自 1979 年 Charney 领导的研究小组最早提出这个值存在  $1.5\sim 4.5\text{ }^\circ\text{C}$  的范围以来,40 多年科学界的认识一直存在着较大的不确定性。这意味着我们对于温室气体排放对全球气温的影响程度是不确定的,如果气候敏感性的值很高,就意味着地球气温对温室气体排放的响应很大,减排非常紧迫;如果值很低,就意味着响应很小,温室气体排放的影响不大。

2020 年,在世界气候研究计划(WCRP)支持下,全球 25 位该领域的顶级科学家,在综合近年多项研究的各种证据链的基础上,对气候敏感性的范围进行了估计。他们发现,最新的研究成果已经可以证明,气候敏感性的可能范围可以缩小至  $2.6\sim 3.9\text{ }^\circ\text{C}$ 。这项工作是一个里程碑似的工作。最重要的意义在于,它排除了  $\text{CO}_2$  倍增情况的下限增温  $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,该数值已经变为  $2.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。

这一评估是在过去多年研究的基础上对现有证据链的全面评估。主要的三条证据链包括:(1) 现代气候的变暖程度;(2) 对气候反馈过程的最新理解;(3) 来自古气候记录的信息。其中第一条证据链是现代气候的变暖。自 1800 年代开始有观测记录以来,全球平均气温已经上升了  $1.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。如果保持这个变暖趋势不变,未来将会产生较低的变暖值。但是最近的观测表明,地球的变暖并不均匀。尤其是,东太平洋和南大洋的部分冷水区还没开始变暖,那些地方的深冷水流会不断上升并吸收热量。最终,模式和古气候记录表明,这些水会变暖—不仅作为热汇的作用减弱,而且还会促使上方云层的形成,这些云层会捕获更多的热量,导致更多的变暖。针对这一观测事实调整温度预测值可以排除低敏感性的估计。第二条证据链是对反馈过程的理解,气候系统的反馈过程可能减慢或者加速气候变化。其中

云反馈过程被认为是气候敏感性不确定范围的重要来源。云反射阳光或者捕获热量,以此冷却或者加热地球温度。特别是,在远离海岸线形成的大量的层积云,如果变暖背景下这些云继续增加,他们可能会产生冷却效应。近几年的研究通过高分辨的云模式发现,存在相反作用的两种反馈过程,使云变薄和使变暖更厉害。在模式里,更高的气温使得更多的干空气渗透薄的云,阻止他们变厚。同时,更多的  $\text{CO}_2$  捕获了云顶附近的热量较高的  $\text{CO}_2$  含量将热量滞留在云层的顶部,从而抑制了使得更多云层形成的湍流。卫星证据已经在变暖更严重的区域部分证实了这些云动力学。更多的证据表明,云反馈是正反馈,但不是超级反馈。第三条证据链是从古气候记录中获得的信息。研究小组查看了过去两种气候的记录,包括 2 万年前末次冰期的盛期和 300 万年前的温暖期,最后一次大气中  $\text{CO}_2$  的浓度水平与现代气候相似。最近的工作表明,气候敏感性不是地球的固定属性,而是随时间变化的。例如,在温暖的时期,冰盖的缺乏可能会提高灵敏度。古代温度和  $\text{CO}_2$  水平的记录使团队能够确定寒冷和温暖的时期的灵敏度分别在  $2.5\text{ }^\circ\text{C}$  和  $3.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。也就是说,即使对于最冷的气候状态,低于  $2\text{ }^\circ\text{C}$  的敏感性似乎也可以忽略不计。

气候敏感性是全球气候变化科学研究中非常核心的科学问题。2020 年发表的这项工作等多项研究的基础上,利用贝叶斯方法进行了综合评估,终于缩小了气候敏感性的不确定性范围,排除了  $\text{CO}_2$  倍增情况下最温和的升温情况。相比于工业化前 280 ppm 的  $\text{CO}_2$  浓度水平,现在地球大气中  $\text{CO}_2$  的浓度已经达到了 420 ppm,距离工业化前浓度的倍增值已经只有一半的上升空间,这意味着减排已经势在必行。从另一方面讲,这项研究也排除了最糟糕的情况, $\text{CO}_2$  倍增以后升温达到  $4\text{ }^\circ\text{C}$  以上的可能性变小。这一研究成果给出了全球变暖的一个更清晰的图像,可以为海平面上升、经济损失和其他许多预测提供信息。这一关键指标不确定性范围的减小将为更多地区采取减排行动提供重要的科学基础,促进地方政府减少排放和适应气候变暖。

中国目前在气候变化研究领域开展了大量工作,对科学认识气候系统对温室气体的响应和反馈做出了贡献。鉴于气候敏感性研究主要涉及的领域包括现代变暖、气候模式和各种反馈机制以及古气候信息,未来需要加强的方向包括:对现代气候变暖原因的理解和分析,如对区域气候变化的原因、东太平洋和南大洋海温作用的深入认识;对气候模式中

物理过程的理解,一些重要的反馈过程,包括云反馈等机制的理解;对古气候信息的理解,尤其是理解其对现代和未来气候变化的意义。

#### 4 发现快速射电暴来源

快速射电暴这一全新的极端射电爆发现象,自2007年首次被美国科学家 Lorimer 等人发现并报道之后便很快成为当前天文物理领域的研究热点。然而,经过十几年的研究,快速射电暴的产生机制和物理起源至今仍是未解之谜。鉴于快速射电暴极短的爆发时标、极高的亮温度等特征,很多天文学家猜测磁陀星(magnetar)是产生快速射电暴的最佳候选体。磁陀星一般认为是磁场极强的中子星(也可能是奇异夸克星),其磁场可以达到十亿特斯拉,是地球表面磁场的百万亿倍(图4)。2020年4月28日,加拿大氢强度测绘实验(CHIME)射电望远镜首先探测到了来自于银河系内的一颗名为 SGR 1935+2154 磁陀星的毫秒射电爆发。这一重大观测突破,一方面证实了磁陀星是快速射电暴的一种起源,另一方面却给天文学家带来了更多的困惑:磁陀星如何产生快速射电暴?快速射电暴是否存在不同的分类?具有重复爆发特征的快速射电暴的起源是什么?等等。依托国内外一系列地面和空间天文观测设施,特别是中国500米口径球面射电望远镜FAST,我国科研人员正在引领解答这些谜团。

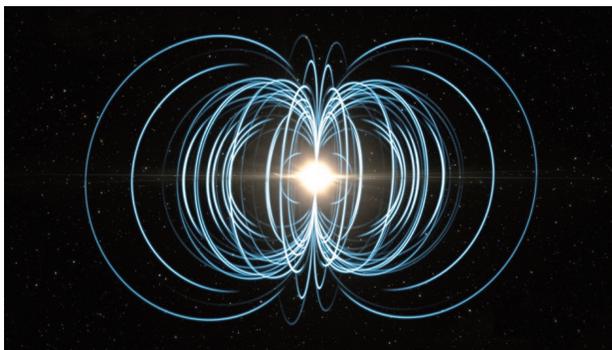


图4 磁陀星艺术图(图片来源:Science 官网)

#### 专家点评:



**吴雪峰** 中国科学院紫金山天文台研究员,中国科学技术大学教授、博导,中国天文学会空间天文和高能天体物理专业委员会主任。入选中国科学院青年创新促进会会员和“百人计划”,获得国家自然科学优秀青年科学基金和杰出青年科学基金、青海省重大科技专项等资助。

#### (1) 研究背景

快速射电暴(Fast Radio Burst,简称FRB)是宇宙空间中一种持续时标为毫秒量级的射电脉冲信号,瞬时辐射流量可达数十央斯基,爆发的总能量相当于太阳几天甚至几个月内辐射的总能量。FRB的高色散量(低频相对于高频的时间延迟,表征传播路径上穿过的电子柱密度)表明它们可能起源于银河系以外的遥远宇宙,部分FRB宿主星系的观测和定位已经证实了这一推论。绝大多数FRB都是一次性爆发,转瞬即逝,仅在射电望远镜的历史数据中留下痕迹,难以进行后随追踪。幸运的是,有些FRB能在同一个位置以同样的色散量多次爆发,提供了对其持续监测的可能,这一类暴被称为重复暴。至今已有几百例FRB被观测到,其中约20例为重复暴,然而FRB的起源依然迷雾重重。近年来天文学家已经提出了一百多种FRB起源假说,其中包括双中子星的并合、磁陀星的耀发、黑洞的蒸发、中子星与小行星的碰撞等。由于FRB的持续时标很短(表明其辐射区域尺度非常小)、亮温度达到了 $10^{36}$ 开尔文(高于脉冲星磁层里的相干辐射过程),因此磁陀星可以产生(至少部分)FRB是当前的主流观点。

#### (2) 积累与运气

加拿大氢强度测绘实验(CHIME)射电望远镜由四个100米长、20米宽的网状弧形天线组成,能够随着地球的转动对天空进行漂移扫描,视场远大于其它单口径的射电望远镜。设计之初是用于探测宇宙中性氢原子的分布规律。后来经过改造升级,实现数字波束合成,可对FRB进行搜寻,至今探测到的FRB大多数由它贡献。

2020年4月28日,CHIME探测到来自银河系内磁陀星(SGR 1935+2154,距离地球约3万光年)方向产生的快速射电暴FRB 200428。同时,美国瞬态天文射电辐射探测2号(STARE-2)项目的三个射电天线也捕捉到了该事件。在射电脉冲信号之前约8.62秒,我国的“慧眼”号硬X射线调制望远镜(Insight-HXMT)和欧洲航天局的国际伽玛射线天体物理学实验室(INTEGRAL)等空间伽玛射线望远镜探测到了与FRB 200428成协的X射线爆发现象。FRB脉冲与X射线暴存在8.62秒的时间延迟,与等离子体色散对射电波传播的影响高度吻合。时间和空间上的一致性,充分表明了这次FRB与X射线暴之间成协的可靠性。

FRB 200428一系列的观测事实给天文学家带

来三个惊喜:1)首次在银河系内发现快速射电暴;2)明确磁陀星可以产生 FRB;3)首次证实 FRB 在瞬时辐射阶段存在其它电磁波段的对应体,即 X 射线爆发。每一个惊喜,都显而易见地带来人们对 FRB 这一现象新的认知。这次观测大丰收,是天文学家们不错的运气(成协事件率低),更是长期以来国内外各研究团队对 FRB 观测持续投入的必然结果。

### (3) 迷雾中的光芒

基于 FRB 200428 的发现,理论学家们得出两个主要结论:1)至少部分 FRB 是来自于磁陀星;2)FRB 的能量供给来源于磁能释放,而非转动动能释放。后续观测还发现,磁陀星起源的 FRB 与 X 射线爆发成协比例极低。造成成协事件率低的可能原因包括:FRB 存在高度相对论性或特殊几何位形导致的集束效应;FRB 的能谱很窄并且在主流观测波段之外;FRB 的产生条件很特殊——大多数 X 射线爆发过程中不会伴随 FRB 产生。

虽然 FRB 200428 的观测给 FRB 研究带来了长足的进展,但是一些重要问题依然困扰着我们:是否存在本征的非重复 FRB,以及这些非重复 FRB 的来源是什么?除了磁陀星,还有哪些源可以产生 FRB? 还有一直以来最难回答的——产生 FRB 的空间位置在何处(靠近磁层,还是远离磁层),以及相干辐射通过何种机制产生的? 不过,本次观测为将来的研究指明了一个方向,即对磁陀星的持续监测将很有希望揭示 FRB 更多的观测特征,从而给理论模型提供更多限制。

### (4) 初露锋芒

在此次观测发现中,中国学者利用中国自己建立的大科学装置,做出了重要贡献。我国 500 米口径球面射电望远镜(FAST)灵敏度极高,但是视场较小,适合对单一源进行长期监测。在 FRB 200428 被探测到的前后,FAST 对 SGR 1935+2154 进行了四个时间段共计 8 小时的监测,虽然观测到了剧烈的 X 射线爆发,但没有观测到射电脉冲辐射。借助 FAST 超高的灵敏度,结合 CHIME 望远镜和 STARE-2 的探测,FAST 实现了对 8 个数量级亮度空间的覆盖,给出了这一银河系内快速射电暴源迄今最严格的射电流量限制。我国的 Insight-HXMT “慧眼”卫星凭借其优异的性能,给出了此次 X 射线爆发最佳的时间分辨率光变曲线,并且展示了详细的能谱演化。近期,FAST 还揭示了另外一个快速射电暴 FRB 180301 若干个重复暴的偏振位置角存在“摇摆”的特征。这一特征普遍存在于脉冲星中,

从而在理论上支持 FRB 起源于旋转的中子星磁层。

目前 FAST 在进行相关扩展阵列的筹建与实时探测方法的升级,以期能够提升对快速射电暴的定位精度与探测能力。预计将来能够取得更多的突破性成果。

### (5) 前景展望

FRB 研究已经由最初的机遇性发现,转为利用专用设备进行针对性巡天,并且有选择性地持续监测。因此,各大设备目前亟待建设、升级以提升对 FRB 的观测能力。随着 FRB 样本数目的大幅度提高,人们将不断发现高红移或者高色散量的 FRB,从而利用快速射电暴揭示宇宙重子物质分布,检验基本物理假设,开拓 FRB 的宇宙学应用。对大量重复暴的观测,得到其辐射能量和等待时间分布,能够有效限制起源模型。同时,监测 FRB 的多波段电磁对应体(如 X 射线或光学)甚至中微子对应体,对甄别 FRB 的起源模型极为关键。不久的将来,多波段多信使望远镜协同观测将是 FRB 研究取得重大突破的一个主要途径。

## 5 世界上最古老的狩猎场景面世

2020 年 12 月,澳大利亚科学家报告了一幅在印度尼西亚发现的洞穴艺术画作,这幅作品描绘了一些类人形象狩猎猪和水牛的画面。研究人员使用铀系法,为这幅 4.5 米宽的岩石艺术作品进行了测年,结果发现其至少可追溯至 4.4 万年以前,是迄今已知的最早狩猎场景。

研究人员认为,画中出现半兽人可能表明,印度尼西亚的洞穴艺术早在人类首次在欧洲进行艺术创作之前,就表现了关于人与动物联系的宗教式思考。

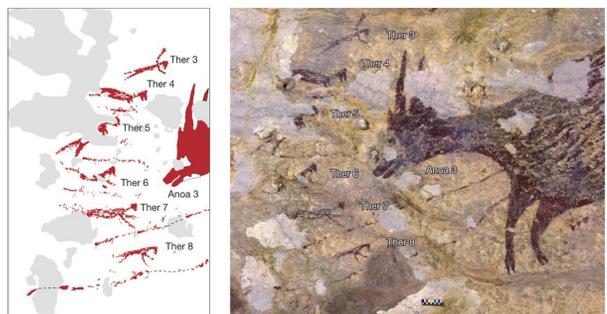


图 5 壁画的一部分。“Ther”指“半人”,“Anoa”指倭水牛(图片来源:Science 官网)

## 专家点评:



**高星** 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所研究员,中国考古学会旧石器专业委员会主任。主要研究领域是东亚人类起源、演化和史前先民行为与生存模式。提出现代人类起源与演化的“区域性多样化模式”和“旧石器时代东方行为模式”,荣获中国考古学会金鼎奖,获选中国科学院2018中国科学年度新闻人物。

现代人类的起源与扩散及其行为方式是最近30多年来学术研究的热点。其中早期现代人行为现代性(Behavioral Modernity)的发端、认知能力的跃变和社会关系的复杂化是焦点与难点。由于人类思想意识和社会关系很难留下物化证据,考古学界对该领域的研究长期饱受证据缺失或多解性的困扰。2019年12月11日,《Science》在线首发在印度尼西亚苏拉威西岛上发现的距今至少4.4万年前的一组洞穴壁画,认为该壁画第一次以绘画叙事的方式展现了目前所知最古老的人类狩猎场景,并将其中的一些形象解释成半人半兽,显示了人类与动物的复杂关系,据此推断当时人类对并不真实存在的事物已有幻想与创作的能力,指向现代人类认知能力的出现和宗教意识的萌芽。这项发现和对其意义的阐释引起学术界高度关注,被《Science》选为2020年“十大科学突破”之一。

该幅壁画发现于一个灰岩洞穴后部的洞壁上,在4.5米宽的范围内用单色勾画了至少6个动物形象,可辨识出疣猪和倭水牛,这两类动物在该地区目前仍然生存着。在这些动物的旁边出现至少8个可辨识的“半人”(Hemianthrope)形象,绘制简约,与动物造型相比纤细、渺小,既有人形态又有动物特点,包括长而突甚至呈鸟喙状的吻部。有的“半人”手握细长物件,像是长矛或绳子。

对于研究史前壁画,一项重大挑战是测年。研究者揭取了四个覆盖在壁画上的珊瑚状次生碳酸盐样品做铀系测年。这些样品被分成18份以做交叉验证。经测定分析,四个样品分别给出43.9 ka、41 ka、40.9 ka和35.1 ka的数据。由于这些次生碳酸盐是在壁画生成后经过水的淋漓作用而形成,因而壁画绘制的年代要早于测年样品的年代,据此断定该组壁画创作的时间早于距今4.4万年。

考古学的要义是透物见人。对这些古老壁画所表达的人类行为与思维如何解释是研究的关键。研究者认为不排除这些“半人”是猎人披着兽皮、带着面具伪装成动物以利狩猎,兽群由另外一些人驱赶

至设伏的猎者附近被宰杀。诚如是,则该壁画形象地描绘了目前所知最古老的人类集体狩猎的方式与策略。作者还指出,如果画中的细长物件是绳索,则表明该地更新世晚期的猎人已在从事生擒成年野猪和水牛的活动,一项具有冒险精神的生计活动。

但文章的作者并不十分认可“伪装狩猎”的解释,认为那些人形过于微小,人类将自己伪装成鸟一样的小动物的可能性很低;这些“人”兼具人与动物的形态,应该是有意表达一种半人半兽的思想。“半人”在现实世界中并不存在,因而它应该来自创作者的想象与认知活动。史前艺术作品中的“半人”形象通常被认为与萨满信仰和幻象有关,希冀借助动物“通灵”以求得帮助。这些“半人”是否有这样的寓意,或者这些形象意味着画者将人类视作动物界中不可分割的一部分,表达一种类似“天人合一”的意念,作者并不能确定。

该项发现具有重要的学术价值与意义。这幅壁画作为目前最早的象征性艺术遗作对于研究旧石器时代(至少是其晚期)人类狩猎方式、想象能力、认知发展和宗教起源,提供了珍贵的资料,对研究早期人类对自己在自然界中的定位和与其他动物关系的思考提供了重要信息与启示。这幅作品是目前发现最早的用图画叙事方式记述生产生活情形与事件的文化证据,对于追溯人类以“讲故事”的方式口传历史这一传统的起源和语言发展、社会关系演进具有重要研究潜力。此外,这项发现还表明,最早具有宗教色彩的艺术表达出现在印尼的苏拉威西岛,而不是被认作人类思想与宗教的发源地—欧洲,这颠覆了长久以来史学界以欧洲为中心的狭隘认知和偏见。

当然,对于壁画中若干形象的角色确定和寓意阐释,肯定会智者见智仁者见仁。将那些乍看像螳螂一样的微小生物解释为“半人”,并进而演绎出创作者超越现实的想象力乃至宗教、巫术的萌发,肯定会受到一些学界人士的质疑;相反,被作者认为可能性不大的“伪装狩猎”假说,对一些研究者来说可能更具合理性。好在作者并非异想天开,也不是无中生有。多年来考古学家在非洲、欧洲、亚洲、澳洲孜孜以求远古人类行为方式、艺术起源、认知发展和社会关系的考古证据,已经积累了很多素材,取得了关联性的认识。苏拉威西岛的新发现是这项探索与努力进程中的新里程碑,会引来更多的发现和更深入的认识。

相对于其他地区,中国在旧石器时代艺术与认知研究方面还鲜有重要发现和成果。虽然在宁夏、

新疆、内蒙古、西藏、云南、广西乃至大兴安岭地区发现很多先民的岩画、壁画(以前者为多),但绝大多数被认定为新石器时代乃至青铜时代、早期历史时代的作品,还未有确定的此类旧石器时代艺术品被学术界认可。究其原因,一方面是针对这类遗存测年技术等研究手段滞后(在此方面我们正在迎头赶上),另一方面是考古调查与研究的欠缺,很多区域还未被系统勘察过,尤其是贵州、广西、福建等岩溶洞穴发育的喀斯特地区,有很多旧石器时代人类生存的线索,未来取得类似重要发现的可能性是存在的。当然,人类的行为与意念表达方式是多种多样的,现在如此,史前亦然。因而也有一种可能性,即生活在华夏大地的旧石器时代人类的认知与表达有自己的方式与特点,所留下的遗存与苏拉威西等地的壁画不同。无论如何,我们应该花更大的气力去寻找、去辨识,以期对破译远古人类生存行为与精神世界的诸多谜团取得更大的成就。

## 6 AI 首次精准预测蛋白质三维结构

50 年来,科学家们一直致力于解决生物学领域最大的挑战之一:预测一系列氨基酸在“变身”为工作蛋白质时会折叠成何种精确三维形状。今年,他们实现了这个目标。

2020 年 12 月 1 日,谷歌旗下的 DeepMind 公司宣布,其新一代 AlphaFold 人工智能系统在国际蛋白质结构预测竞赛上击败了其余参会选手,精确预测了蛋白质的三维结构,准确性可与冷冻电子显微镜、X 射线晶体学等实验技术相媲美。

研究人员指出,鉴于蛋白质的精确形状决定了它的生化功能,这一新进展可以帮助研究人员发现疾病的发病原理,开发新药,甚至创造出耐旱植物和更便宜的生物燃料。

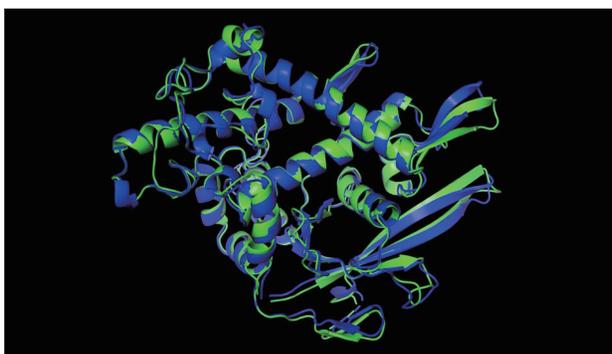


图 6 AI 首次精准预测蛋白质三维结构  
(图片来源:Science 官网)

### 专家点评:



卢培龙 现任西湖大学生命科学学院特聘研究员,博士生导师。主要研究方向是蛋白质设计。精确设计了多次跨膜蛋白以及纳米孔膜蛋白的三维结构。在 *Nature*、*Science* 等重要学术期刊发表多篇研究论文。主持国家重点研发计划等多项科研项目。

蛋白质是生命活动在分子水平上的执行者,他们的功能是由其三维结构决定的。通过解析蛋白质的高分辨率三维结构,不仅可以清晰地阐释蛋白质执行功能的分子机理,还可以根据蛋白质的结构来设计相关的药物。在过去几十年里,人们主要通过 X 射线晶体学、冷冻电子显微镜或核磁共振等实验技术手段来解析蛋白质的三维结构,然而在实验过程中往往会有多种技术难关,费时费力,也需要依赖昂贵的大型仪器和大科学设施。

有没有快速、便捷的方法获得蛋白质的三维结构呢?在 20 世纪 60 年代早期,Christian B. Anfinsen 通过实验证明,蛋白质的三维结构是由其一级序列决定的,即蛋白质三维结构信息已经包含在序列信息中。一直以来,科学家们通过计算生物学的方法,从蛋白质的序列出发,预测蛋白质的三维结构,也取得了很大的进展。如果蛋白质序列在蛋白质结构数据库中有同源的结构存在,科学家使用基于模板的算法,可以很好地预测蛋白质的三维结构。如果没有同源结构,尽管对于少部分蛋白质,可以精准地预测其结构;但是整体而言,对于大多数蛋白质,预测结构的精确度并不高、鲁棒性较差,所以蛋白质三维结构的预测技术很难与实验技术相媲美。

2020 年 12 月 1 日,谷歌旗下的 DeepMind 公司宣布,其开发的新一代人工智能系统 AlphaFold2 在第 14 届国际蛋白质结构预测竞赛(CASP14)上精确预测了蛋白质的三维结构,大幅提高了预测准确性的竞赛纪录。AlphaFold2 的成功主要体现在其准确性和鲁棒性:对于 90 余个蛋白质序列,有接近三分之二的预测结构同实验模型非常接近,其整体距离测试—总分(GDT-TS)都超过 90 分(90 分意味基本达到实验精度);对所有蛋白结构预测的中位 GDT-TS 分数为 92.4 分;针对困难蛋白靶点,中位 GDT-TS 评分也可以达到 87 分,大幅领先第二名达 25 分之多;作为鲜明的对比,之前竞赛的中位 GDT-TS 分数纪录约为 60 分。这是人类首次可以较稳定地进行蛋白质的三维结构的精准预测,是一个里程碑式的突破,因此被 *Science* 杂志评选为 2020 年十大科学突破之一。

这一突破无疑会对生物学研究和应用有着深远的影响。成熟的、普适的蛋白质结构预测工具将极大加速解析蛋白质结构的过程,高通量的蛋白质结构预测将破解结构数量远远落后于序列数量的难题,也会为通过实验技术手段解析超大、动态的蛋白质结构提供模板,进而促进人们对于蛋白质功能的理解和相关药物的开发。三维结构预测上的成功,也将惠及蛋白质设计领域,可以提高设计的精确度和成功率,也可以基于人工智能开发新方法,快速高效进行新结构、新功能的设计。

蛋白质结构预测的问题并没有完全解决,仍然需要很多工作。尽管 AlphaFold2 可以高精度预测蛋白质结构,但值得注意的是,在结果中还有超过三分之一的蛋白质的结构预测没有达到实验精度;而且蛋白质折叠过程和原理也有待进一步研究。此外,对于蛋白质—蛋白质相互作用、蛋白质动态结构变化以及蛋白质—生物分子复合物的结构也需要新的方法来预测。生物学同物理学、化学、数学、计算机学等学科的进一步交叉融合将会为这些问题与挑战的解决带来新的思路。

蛋白质结构预测具有的巨大科学意义和影响,这使它成为国际竞争的焦点:谷歌、IBM、微软、脸书等企业争相加大投入,参与这方面的竞争。我国科学家在蛋白质结构预测领域中非常活跃,不断取得具有国际影响力的研究成果:如开发 I-TASSER 算法,率先引入卷积残差神经网络提高接触图谱计算准确度(这也是 AlphaFold1 成功的基石),开发 trRosetta 算法等。腾讯公司等团队积极参加 CASP 竞赛,排名位于前列。国内人工智能技术迅猛发展,有较好基础。国内蛋白质结构预测领域的研究还需要努力,在国家的大力支持下,希望较快达到并超过 AlphaFold2 水平。

## 7 “精英控制者”开启治疗艾滋病新策略

一小部分罕见的群体,在感染艾滋病毒后,能够长期在不使用抗病毒药物的情况下,控制艾滋病毒感染的进展,他们被称为“精英控制者”。

2020年,一项针对64名艾滋病毒感染者研究,揭示了他们的不寻常成功与病毒在其基因组中的定位之间的联系。这些“特殊患者”多年来未曾使用抗逆转录病毒药物,并一直保持健康状态。这些新的理解虽然暂时无法达到治愈艾滋病的目标,但开辟了一种新的策略,使感染者能在不服用药物的情况下生存数十年。

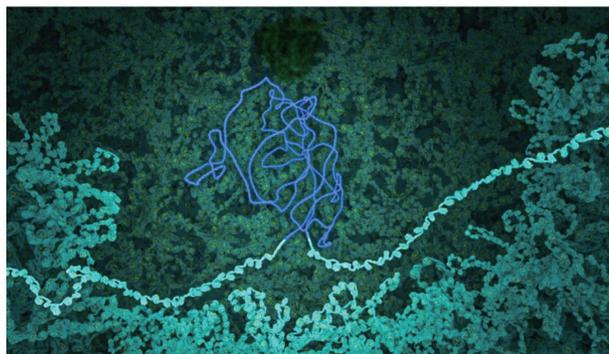


图7 “精英控制者”开启治疗艾滋病新策略  
(图片来源:Science 官网)

### 专家点评:



张辉 中山大学人类病毒学研究所教授、所长。以第一和通讯作者在 *Nature*、*The New England Journal of Medicine*、*Nature Medicine*、*Immunity* 等高影响力杂志上发表多篇学术论文。主持“十三五”国家传染病重大专项、国家自然科学基金重点项目等。最近主要研究方向有:针对新冠病毒的分子病毒学和纳米颗粒疫苗研究;艾滋病毒潜伏感染的机理;抗病毒免疫反应。



周末 中山大学中山医学院博士研究生,目前从事 HIV-1 潜伏相关工作研究。

HIV-1 感染者中存在着一小部分群体,在没有联合抗逆转录病毒疗法(Combination Antiretroviral Therapy, cART)或其它抗病毒手段介入的情况下,可以自行长期控制体内的病毒复制和疾病进展,其血浆病毒浓度常常在常规检测之下,我们通常称这些感染者为精英控制者。这部分特殊群体的存在证明了人体可以通过自身免疫反应长期控制 HIV-1 复制。精英控制者控制病毒复制的能力是多因素免疫监控综合在一起导致的,用单一因素无法解释这种现象。其中 HIV-1 特异性细胞免疫反应是影响 HIV-1 控制能力的重要因素。

HIV-1 可以将自身的基因组整合进人体基因组中,整合进宿主基因组中的“前病毒”可以长期潜伏,形成了 HIV-1 的病毒储藏库。关于精英控制者的免疫学特征已被研究报道,但是其病毒储藏库的结构特征却一直没有被阐明。这篇关于精英患者病毒储藏库的论文详细报道了这部分人群病毒储藏库的特点——多分布于异染色质区域的“深层”储藏库。

不同的前病毒分布在不同的染色质区域,根据整合区域的染色质状态,我们可以将病毒储藏库分为“可激活的储藏库(浅层)”和“深层储藏库”。所谓“可激活的储藏库”指前病毒整合的染色质区域在自然状态下处于开放或转录活跃状态,或者在抗原或激活剂等外界刺激的情况下染色质结构打开或驱动转录。这部分储藏库容易被激活而逆转潜伏的状态,因此常常处于不稳定的状态。在暂停药物治疗后,这部分储藏库会造成体内病毒迅速反弹。当前 HIV-1 的热点研究“shock and kill”的策略,就是利用潜伏激活剂来激活这部分 HIV-1 前病毒,再通过免疫系统识别消灭被感染的细胞,达到清除储藏库的目的。

然而也有研究发现,即使再强力的潜伏激活剂,也无法激活所有的病毒储藏库,这些不能被诱导表达的储藏库,我们可以称之为“深层储藏库”。这一科学研究发现了精英控制者体内的 HIV-1 病毒储藏库更倾向于形成一个“深层储藏库”的状态,其前病毒整合大多位于基因沙漠或转录不活跃的异染色质区域,这部分的前病毒很难被诱导表达,处于一个长期甚至永久潜伏的状态。精英控制者体内的深层储藏库应该是在有效的免疫监控这一长期选择压力下的结果;即体内可被诱导表达的“可激活的储藏库(浅层)”被精英控制者强大的免疫系统不停地识别和清除,达到了一个类似于功能性治愈的状态。

不同的治疗 HIV-1 策略需要一定的检测手段来评估治疗效果,除了常规的临床指标外,治疗前后的 HIV-1 潜伏储藏库大小也是很重要的评价标准。这项科学研究的重要内容之一,是利用各种高通量的测序分析技术,精确测量评估 HIV-1 前病毒潜伏储藏库的结构特点。精准诊断 HIV-1 病毒潜伏储藏库的大小和鉴定病毒储藏库的状态,对于评估临床治疗效果有很好的指示作用。因此,可激活储藏库的清除是否可以作为功能性治愈 HIV 的标准之一?如何诊断鉴定可激活和深层储藏库的区别,是否有方法学上的标准?这些都是未来 HIV-1 病毒储藏库研究领域需要回答的重要问题。尤其重要的是,一般的 HIV-1 患者不具有在自然状态下控制 HIV-1 的能力,强力的 HIV-1 特异性细胞免疫有可能是精英控制者控制病毒复制的关键。通过深入了解精英控制者的 HIV 特异性免疫机制和潜伏储藏库结构特征,我们可以更好地设计治疗策略,诱导大部分患者在停药情况下可以控制 HIV-1 病毒血症,从而达到功能性治愈艾滋病的目标。

## 8 首个室温超导体面世

自 1911 年超导首次发现以来,寻找能在室温条件下达到的超导体一直是众多科学家竞相追求的目标。2020 年,科学家们发现了首个实现室温超导的材料,在被挤压到接近地球中心的压力的条件下,一种含氢和碳的化合物。此前研究表明,富氢材料在高压下可以将超导温度提高至  $-2^{\circ}\text{C}$  左右。此次,美国科学家在最新研究中将可以实现零电阻的温度提高到了  $15^{\circ}\text{C}$ ,但这是在  $2.67 \times 10^{12}$  pa 压力下的一个光化学合成三元含碳硫化氢系统中实现的。这一发现促进了室温超导体的研究工作——这类材料可以带来重大技术变革并节约大量能源。

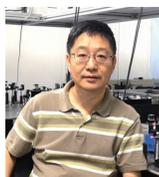


图 8 首个室温超导体面世(图片来源:Science 官网)

### 专家点评:



**谢心澄** 中国科学院院士,发展中国家院士,美国物理学会会士。现任国家自然科学基金委员会副主任,《中国科学:物理学 天文学》主编。长期从事凝聚态物理理论研究。主要研究领域包括量子霍尔效应、电荷及自旋输运、低维量子体系,及强关联电子体系等。



**王楠林** 北京大学物理学院量子材料科学中心讲席教授,美国物理学会会士。主要从事超导和强关联电子体系的低温物性研究。

超导电性是具有巨大应用前景和重要科学意义的研究课题。但是长期以来人们所发现的超导体其临界转变温度都很低,基本上都需要在液氦温区才能获得有效的应用,这使得超导的大规模应用受到严重限制。为了克服低温条件的限制,人们一直期

望发现临界温度更高的超导体。1986年铜氧化物高温超导体和2008年铁基高温超导体的发现,都在世界范围内掀起了研究和探索高温超导电性的热潮,但是这些超导体的临界温度常压下最高只达到135 K,高压下可至164 K。在室温下即可实现超导的材料一直是超导和材料科学领域人们梦想和追逐的目标之一。2020年首个室温超导体终于在高压条件下得以合成,这一重要发现和进展入选 *Science* 杂志2020年度的“十大科学突破”之一自然是预料之中的。

该成果是由来自美国罗彻斯特大学 Dias 领导的小组与英特尔公司和内华达大学的研究人员合作努力所取得的。他们将碳和硫元素以1比1摩尔比率混合,球磨成直径5微米以下的颗粒,随后装载到金刚石顶砧中。氢分子充入其中,扮演反应物和传压介质的双重角色。整个样品随后被施加4 GPa (1 GPa $\approx$ 1万大气压)的压强,并用波长532纳米的激光加热进行化学反应。合成的样品在宽广的压力范围140~275 GPa内呈现超导特性,并在 $267 \pm 10$  GPa压力下观察到临界温度为288 K(约摄氏15 $^{\circ}$ C)的超导转变,从而实现了室温超导。

该重要突破并非源自偶然的发现,而是建立在对氢元素体系高压下量子物性长期研究积累基础之上,特别是和近年来富氢结构材料高压条件下已经实现的高温超导电性密切相关。人们熟知通常条件下单独的氢原子不会形成金属体系,两个氢原子会牢固结合成氢分子(结合能在4 eV以上),在低温下形成的固体是绝缘体。1935年 Wigner 和 Huntington 预言在足够高的压力下,绝缘的分子氢将转变为金属态的原子氢。后来估算所需压强大约为500 GPa。在这样高的压强下,氢之间距离很短,加上氢原子质量最轻,因此其声子频率很高并且电声子耦合很强。1968年 Ashcroft 依据BCS超导理论预言高压下的金属氢应该是高温超导体,之后的估算给出转变温度在室温以上。2004年 Ashcroft 进一步指出富氢的材料体系可能在较低的外加压力下实现高温超导,因材料本身氢原子之间已经存在强的化学压力。最近几年在这方面的计算和实验研究更是取得许多突破性进展。2014年,吉林大学的马琰铭和崔田两个团队基于对BCS理论的计算,各自做出了关键预言,前者预言 $H_2S$ 在160 GPa下超导临界温度为80 K,后者则认为 $H_2S$ 与 $H_2$ 复合成的 $H_3S$ 结构在200 GPa附近超导临界温度在191 K

至204 K之间。2015年德国马普化学研究所的 Eremets 研究组首次实验发现155 GPa高压条件下硫化氢材料在203 K发生超导转变。2019年美国华盛顿大学 Hemley 研究组和 Eremets 研究组分别独立报道超高压下合成的笼型富氢材料 $LaH_{10}$ 具有215~260 K的近室温超导。

Dias 小组的工作是在先前 Eremets 研究组关于硫化氢材料体系中添加了额外的碳元素构成三元化合物,并且加压到了更高的压力,从而把超导转变温度进一步提升至室温。但是目前所形成的室温超导体结构尚不清楚,实验结果也还需要其他研究组的重复和验证。最近北京理工大学的姚裕贵和罗彻斯特大学的 Xu 等研究人员分别对其可能稳定的结构进行了计算和讨论。

我国在该研究领域已经具备良好的积累和基础,上面提到的我国理论计算为实验探索高压下高温超导材料体系做出了有效的理论预言,为实现高压下高温超导做出了重要贡献;中国科学院物理研究所的实验工作者也在金刚石对顶压砧腔内利用激光加热方法制备出转变温度为240~250 K的 $LaH_{10}$ 高温超导体,展现了在超高压下合成富氢材料高温超导体的能力,为探索新的高压下高温超导体奠定了基础。

应该指出,上述室温超导体是在金刚石对顶压砧中实现的,样品尺寸也极其微小(只在几十或近百微米),距离应用尚且非常遥远。上述高压下的工作如果能启发探索和制备出无需高压且稳定的高温超导体,那将是意义非凡的工作,也是未来努力的目标之一。

## 9 鸟类的聪明程度超出人们的想象

今年发表的两项研究表明,鸟类的聪明程度超出想象。其中一项研究表明,鸟类大脑的一部分类似于人类的大脑皮层。另一项研究表明,小嘴乌鸦的意识比研究人员想象得还要高,而且其或许能有意识地进行思考。

这种“感觉意识”是人类自我意识的一种基本形式,它在鸟类和哺乳动物中的存在表明,某种形式的意识可以追溯到3.2亿年前,可以追溯到我们最后的共同祖先。



图 9 鸟类的聪明程度超出人们的想象  
(图片来源: Science 官网)

#### 专家点评:



**孙悦华** 中国科学院动物研究所鸟类生态学组组长, 研究员, 博士生导师。长期从事鸟类生态学、行为学和保护生物学研究。2019 年关于虎皮鹦鹉认知表现和性选择的相关论文在 *Science* 发表。现任中国动物学会鸟类学分会副理事长。

2020 年, 两项关于鸟类意识与认知的神经机制的论文在 *Science* 发表并入选 2020 年度十大科学突破。动物的意识指对自己和环境的觉知, 它在生命科学领域是一个复杂的现象。作为动物个体主观的一种感知, 科学家很难从外部观察和研究意识的形成和机制。因此, 在 2005 年 *Science* 特刊中公布的 125 个最具挑战性的科学问题中, “意识的生物学基础”亦位列其中。而探究这个问题的关键就是寻找与意识相关的神经元, 并最终找到意识是如何产生的。

意识的神经相关机制是指能够产生任何一个特定的意识知觉的最小的神经元机制, 其研究之前主要来自于灵长类的端脑皮层。鸟类的弓状皮质尾外侧(NCL)与哺乳动物的前额叶皮质层功能相似, 并被认为与复杂的认知能力相关。Nieder 等(2020)训练两只小嘴乌鸦完成视觉检测任务, 同时监测乌鸦 NCL 脑区神经元的活动。通过分析对比神经元的活动发现表明鸟类具有表现意识的的能力, 在任务过程中乌鸦 NCL 脑区的神经元参与了意识的形成, 从而为意识的系统发育起源提供了证据。同时, 这项研究证明了不仅拥有分层大脑皮层(Cerebral

Cortex)的哺乳动物拥有感觉意识, 缺少分层大脑皮层的鸟类也有这样的能力。

认知是指动物为对外界信息获得、处理、维持和利用的精神过程, 它使动物能够感知环境中的改变并发展解决新问题的办法, 对动物的生存和繁殖尤为重要。近期的研究表明鸟类拥有与哺乳动物相似的认知能力, 包括制作工具和计数能力等。而且动物认知能力在动物性选择中具有重要作用。鸟类和哺乳动物的前脑组织截然不同, 两者的大脑组织在连接和分子特性等方面仅有很小部分是同源的。Stacho 等(2020)使用三维偏振光成像(3D-PLI)技术分析了鸟类 Wulst 脑区和感觉背侧室嵴(sensory DVR)的神经纤维结构, 结果发现这两个区域的结构是由横向板状纤维和正交纵向柱状纤维迭代组成的回路。这种结构被认为是哺乳动物产生认知的一种特殊的神经回路。这表明鸟类和哺乳动物的端脑虽然看似完全不同, 但是因为具备相似的微电路, 处理信息的策略也相同, 所以具有相似的认知能力。

这两项工作都对鸟类认知能力的研究做出了重大的突破, 但是两者的观点并不相同。Nieder 等(2020)的研究结果表明尽管鸟类缺少像哺乳动物特有的分层的大脑皮层, 但是仍然存在意识, 因此认为意识可能是独立于大脑皮层(Cerebral Cortex)而存在。正如文中所说, 很多观点依然认为鸟类平滑的大脑皮层相较于哺乳动物的大脑皮层更加简单, 甚至使用的术语都不相同。“Cerebral Cortex”是用来描述哺乳动物的大脑皮层, 而鸟类和爬行动物的大脑皮层则使用“pallium”。然而, Stacho 等(2020)的研究则证明, 尽管鸟类大脑皮层看似平滑简单且与哺乳动物相差较大, 但是观察其细微结构则存在相似的神经回路。研究发现, 鸟类大脑的绝对体积小于灵长类, 但鹦鹉和鸣禽大脑包含的神经元数量是同等质量灵长类大脑的两倍。因此, 认为“鸟类没有大脑皮层(Cerebral Cortex)”的观点并不准确, 这两项研究体现了动物大脑神经科学的快速发展, 以至于不同分支领域的专家都不熟悉彼此的发现。但无论如何它们都说明鸟类在意识和认知方面拥有很强的能力, 并将进一步促进鸟类和动物意识与认知领域研究的发展。

## Interpretation of 2020 *Science's* Top 10 Scientific Breakthroughs of the Year

(责任编辑 张强)