

编者按

2025年诺贝尔生理学或医学奖、物理学奖、化学奖3项奖,在百年量子世界的回响中打开了高新技术产业发展的无限新空间。今年的物理学奖不仅回答了物理学中一个基本问题,更直接催生了一项有望重塑未来的革命性技术——量子计算;而量子模拟作为一种新型计算范式,凭借其模拟复杂世界的强大能力,可为生理学或医学奖和化学奖中潜在的高新技术产业发展开辟无限探索途径。

诺贝尔生理学或医学奖

识别敌我，免疫系统如何炼出“火眼金睛”

张田勘

北京时间10月6日下午,瑞典卡罗琳医学院宣布,将2025年诺贝尔生理学或医学奖授予美国的玛丽·E·布伦科(Mary E. Brunkow)、弗雷德·拉姆斯德尔(Fred Ramsdell)和日本的坂口志文(Shimon Sakaguchi),以表彰他们在外周免疫耐受方面的发现。诺贝尔评审团认为,“他们的发现是一个新的研究领域奠定了基础,并促进研发癌症和自身免疫性疾病等的新疗法。”

调节性T细胞之谜

免疫系统为何只识别和攻击入侵的病原体和异物物质,而不会伤害人体自身的细胞和器官,一直是一个谜。今年获奖的3位科学家正是因揭开免疫系统识别敌我的谜团而获奖。

人体的免疫系统主要由T细胞、B细胞、淋巴结、胸腺和骨髓等组成,其中辅助性T细胞不断在身体中巡逻,如果发现入侵的微生物,它们会向其他免疫细胞发出警报,由后者对病原体发起攻击。

但是,T细胞需要首先发现谁是敌人,谁是自家人,这就要由T细胞上身的受体来识别。

日本名古屋的爱知县癌症中心研究所的坂口志文于1995年在《免疫学杂志》上首先发表研究结果,宣称发现了一类全新的T细胞,其特征在于其表面携带CD4受体,同时还携带一种称为CD25的受体(蛋白质)。坂口志文设计了一个对小鼠的精巧的实验,证明小鼠的表面上带有CD4和CD25两种蛋白的T细胞是控制自身免疫反应的“开关”。

FOXP3基因控制调节性T细胞的发育

美国的玛丽·布伦科和弗雷德·拉姆斯德尔通过一系列研究,证明了调节性T细胞的存在和功能。在过往的研究中他们发现,受到辐射患坏血病的主要是雄鼠,而雌鼠可以免于这样的灾难。他们意识到,这可能是坏血病的基因突变位于小鼠的X染色体上,雌性小鼠有两条X染色体,其中一条具有健康的DNA,因此能得到保护,但雌性小鼠可将坏血病突变遗传给下一代。

因此,他们决定寻找坏血病小鼠的突变基因。最后他们找到了导致坏血病的基因Foxp3基因。这个基因不只是以前未知的,而且与一组称为叉头盒(FOX)的基因有许多相似之处。这些基因调节其他基因的活性,从而影响细胞发育。

布伦科和拉姆斯德尔在研究中发现,一种罕见的自身免疫性疾病——X连锁多内分泌腺病综合征免疫失调(IPEX,也与X染色体有关)可能是坏血小鼠病的人类变体。在收集大量基因数据库的信息时,他们发现了与小鼠坏血病基因相似的人类基因,即Foxp3。而且,在来自世界各地的儿科医生的帮助下,他们收集了受IPEX影响的男孩的样本,确认FOXP3基因就是人类坏血病的有害突变。

两年后,坂口志文和其他研究人员令人信服地证明FOXP3基因控制调节性T细胞的发育。这些细胞可以防止其他T细胞错误地攻击人体自身的组织。这种情况称为外周免疫耐受。

发现调节性T细胞具有识别敌我的能力,在生命过程和医疗中具有极为重要的作用,比如抑制免疫反应、维持免疫耐受、消除逃逸的自身反应性T细胞,以及可以研发针对疾病的新药物。

(作者:曾任中国大百科出版社编审、《百科知识》副主编,现为专栏作者、学者,有著作和文章若干)

诺贝尔物理学奖

2025年诺贝尔科学奖中的高新技术产业基石

为超导量子计算发展奠定了重要物理基础

林志荣

美国加州大学伯克利分校的约翰·克拉克(John Clarke)、加州大学圣巴巴拉分校和耶鲁大学的米歇尔·H·德沃雷(Michel H. Devoret)、加州大学圣巴巴拉分校的约翰·M·马蒂尼斯(John M. Martinis)3人,因“在电路中发现宏观隧穿效应与能量量子化”荣获2025年诺贝尔物理学奖,为超导量子计算发展奠定了重要物理基础。

在宏观尺度上验证了量子世界独有效应

40年前,这3位科学家将超导芯片置于接近绝对零度的极低温(约-273.13摄氏度)环境,在一个电流偏置的约瑟夫森结电路中观察到了量子化能级以及亚稳态下量子隧穿现象,相关成果以两篇论文的形式发表于物理学顶级期刊《物理评论快报》(Physical Review Letters)。本次诺奖成果作为一项基础研究,核心科学价值是在宏观尺度上验证了量子世界独有的效应,拓宽了人类对量子力学微观尺度的认知边界。

本次诺奖的研究工作受到了1973年诺贝尔物理学奖得主布赖恩·约瑟夫森(Brian Josephson)和2003

年得主安东尼·莱格特(Anthony Leggett)的启发,因而许多人认为安东尼·莱格特作为首个理论提出者与本次诺奖更契合。布赖恩·约瑟夫森和本次诺奖得主约翰·克拉克在剑桥大学师出同门,导师均为著名英国物理学家布赖恩·皮帕德(Brian Pippard)。布赖恩·约瑟夫森高约翰·克拉克两届,在1973年因量子隧穿现象的发现与江崎玲于奈(Leo Esaki)、伊瓦尔·贾埃弗(Ivar Giaever)共获诺贝尔物理学奖。安东尼·莱格特则在1980年代初便预测了超导电路中的宏观变量(如相位或磁通量)可以表现出量子隧穿和分立的能级,他与安努帕姆·加格(Anupam Garg)在1981年合作提出了莱格特-加格(Leggett-Garg)不等式。该不等式是用于区分量子相干性与经典行为,检验宏观实在论的一种方法,而这—理论框架直接促成了本次诺贝尔奖的成果。

40年前,约翰·M·马蒂尼斯为博士生,米歇尔·H·德沃雷为博士后,约翰·克拉克教授也只是加州大学伯克利分校一位40岁出头的青年教授。3人国籍不同、性格迥异,但本着对电路中的宏观隧穿效应与能量量子化的科学兴趣,共同实现了本次诺奖成果的发现。此后,他们在超导量子精

标志着量子力学在更大系统的应用突破

金焰荣

挑战了经典物理的界限,并为量子信息科学奠基。

1988年,这个团队又在《科学》杂志上发表了一篇名为《宏观变量的量子力学:约瑟夫森结的相位差》,通过测量低温下电流偏置的约瑟夫森结从零电压状态向有阻态的逃逸率,与量子力学的预测高度相符,“没有任何可调参数”,确认了约瑟夫森结相位差是一个宏观量子变量。在论文的摘要中,他们自称这是一个“用线接起来的宏观原子”。彼时,德沃雷和马蒂尼斯已经前往法国萨克雷原子能研究所从事独立的研究。莱格特教授(2003年诺贝尔物理学奖获得者)对此评价颇高,认为这比能级量子化更重要。

这一突破性进展,为后续基于超导量子电路量子化的大量开创性进展特别是超导量子计算,打下了坚实的基础。

有可能开创万亿级新市场

利用约瑟夫森效应中奇特的非线性性和电路量子化,还可以构造各种精密测量工具,其中最著名的当属“超导量子干涉仪(SQUID)”。约翰·克拉克正是这一器件的发明者及其应用的大力推广者。

克拉克年轻时对无线电技术着

密测量、超导量子计算等方面亦作出了卓越的贡献。

距规模化量子计算又近了一步

今年诺贝尔物理学奖的发现,不仅为超导量子计算发展奠定了重要的物理基础,也是当前迅速发展的超导量子计算机研发的源头与基石。国际公认的超导量子计算起点始于1999年,日本电气股份有限公司(NEC)的蔡兆申、中村泰信、尤里·帕希克恩等人实现了首个固态量子比特,并首次在宏观量子系统中实现了量子相干操作。笔者曾有幸在蔡兆申、中村泰信团队工作7年,其间听闻并亲历不少珍贵轶事:约翰·克拉克和蔡兆申是非常好的朋友,因而到日本访问时多次下榻蔡兆申家中;中村泰信与米歇尔·H·德沃雷留学均非常严谨,彼此是长期进行深度学术交流的重要伙伴。

本次诺贝尔奖的颁发,标志着人类距离规模化量子计算又近了一步。对量子计算机的探索凝聚了多学科尖端技术的精华,是推动众多领域技术发展的重要牵引力。

(作者:中国科学院上海微系统研究所超导电子实验室副主任、研究员)

北京时间10月7日下午,瑞典皇家科学院宣布,将2025年诺贝尔物理学奖授予约翰·克拉克、米歇尔·H·德沃雷和约翰·M·马蒂尼斯3位科学家,以表彰他们在电路中发现了宏观量子隧穿和能量量子化现象。

长久以来,物理学界一直存在一个根本问题:量子力学的规律能否在宏观尺度显现?本次获奖者的突破性发现回答了这个问题,不仅深化了人类对量子世界的理解,更将量子现象从微观观测领域带入可操控的宏观工程系统,使人类对量子的操控完成了从原理验证到工程实现的关键跨越,为量子计算技术革命铺平了道路,掀开了人类未来拥有无限算力的新篇章。

宏观量子效应突破人类认知边界

经典物理世界是宏观的,物体运动是连续的,相应的能量也是连续的。例如,当我们将一个球扔向墙壁,可以直接看到球会弹回,绝不会穿墙而过。然而在量子世界,能量是量子化的,只能一份份吸收或释放,粒子可以直接穿过障碍物,这就是量子隧穿效应。

过去,量子隧穿效应被认为只存在于微观的原子或粒子世界。一旦到了由大量粒子组成的宏观

尺度,这些量子效应就会消失,物体表现出符合人们日常经验的经典物理行为。

而这次获奖成果的核心价值在于打破了传统认知的边界:获奖者通过精巧的实验证明,这种量子隧穿效应不仅存在于微观世界,同样可出现在一个人手可握、包含数十亿粒子的宏观电路中。

他们构建了一个由超导材料制成的电路,中间以极薄绝缘层隔开,形成所谓的“约瑟夫森结”。在接近绝对零度的极低温条件下,超导体中的电子会结合成“库珀对”,这些库珀对协同运动,使整个系统表现得像一个单一的量子粒子,即宏观系统可作为整体发生量子隧穿,呈现出与微观粒子完全相同的量子特性。更重要的是,它将量子效应从一个只能被动观察的神奇现象,变成了一个可以通过导线连接、测量和控制的工程化系统,为量子技术的实际应用奠定了关键的物理基础。

1928年,物理学家乔治·伽莫夫发现量子隧穿是某些原子核衰变的原因。1970年代,超导理论(BCS理论)和约瑟夫森结的提出为宏观量子现象提供了理论可能。

1980年代中期,在美国加州大学伯克利分校,约翰·克拉克、米歇尔·

建立了超导量子计算的前提

王华兵 孙国柱 李金朋

时间是微观尺寸,比如电子、原子、分子,尺寸不超过纳米级别,然而,3位诺奖获得者展示的超导电路,其尺寸在数十微米量级,已是肉眼可以分辨的尺寸级别。在如此大的尺寸下,观测到量子隧穿和能量量子化现象,说明在特定条件下,量子力学的适用范围可以推广到宏观物体。他们的开创性研究成果,直接激励了人们在诸如质量达数十微克的机械振子、电磁场和玻色爱因斯坦凝聚体中观测类似的宏观量子力学效应,也将使人们进一步去设想在更大甚至人体等宏观物理系统,观测量子力学效应的可能性。

3位诺奖获得者的工作,证明了经过仔细构建的超导电路可以按照量子力学原理运行,而这是能够进一步开展超导量子计算研究的重要前提!此外,实验中所用超导电路的设计、制备与成熟的半导体工艺十分相似,有些还是兼容的,在可扩展、可控性方面有着很好的优势。这个超导电学类似人工原子,其中的量子化能级可以原位控制和改变的,可以通过直流、射频、微波等方式,非常方便地对这些人工原子进行量子态的制备、操控和读取。

H·德沃雷和约翰·M·马蒂尼斯团队针对宏观量子现象进行钻研,他们面临的最大挑战是如何在嘈杂环境中捕捉脆弱的量子效应。

理论物理学家安东尼·莱格特将他们的宏观量子系统与著名的“薛定谔的猫”思想实验相比较。

此次获奖研究最直接影响在于量子计算技术奠定了基础。获奖者之一约翰·M·马蒂尼斯后来成为谷歌量子人工智能团队的负责人,在量子计算领域取得了重大突破,在随机线路采样任务中200秒钟完成经典计算机需1万年的运算,全球首次宣称实现“量子计算优越性”。

百年量子世界的回响

2025年是量子力学诞生100周年,也是联合国教科文组织确定的“国际量子科学与技术年”。从2012年获奖的基于中性原子和离子阱的量子测量,到2022年获奖的光量子纠缠验证,再到今年获奖的超导宏观量子电路,一条清晰的产业路径正在展开,并已发展成为当下量子计算的主流路径。

(作者:上海交通大学教授,上海交通大学系统集成量子信息技术研究中心主任,无锡光子芯片研究院院长,图灵量子创始人)

量子计算正在形成相应产业链

进入21世纪后,全世界的众多研究者积极探索,推动了超导量子技术的快速发展,在材料、架构、性能和理论等方面,都有系统性的进步。从最开始的Pb、Al、Nb到现在的Ta,从最早的超导电荷量子比特、磁通量子比特、相位量子比特到现在各种优化的诸如传输量子比特,从最开始的能量弛豫时间几个纳秒到现在的毫秒量级相干时间,从最开始的单个约瑟夫森结到现在千数量级的超导量子比特规模,从早期“玩具型”的量子算法演示到现今深入开展的量子纠错研究,众多技术的发展,令人对超导量子计算机的实用化充满了期待。

今年诺贝尔物理学奖的颁发,将激励人们在更大物理系统中进行宏观量子力学效应的探索和应用研究,也会推动利用超导量子电路开展暗物质粒子探测和超导量子计算机研究等,对于有重大应用潜力的量子计算机研究,一旦超导量子计算机或者任何一种通用量子计算机实现了,对于全球的各个领域,特别是国防、经济、人工智能等领域都会产生极大影响。

(作者:南京大学讲席教授,获国家自然科学基金青年科学基金项目(A类)资助,苏州大学学位评定委员会副主席)

诺贝尔化学奖

应用前景直击全球性挑战

郎建平

北京时间10月8日下午,瑞典皇家科学院宣布,将2025年诺贝尔化学奖授予北川进(Su- sumu Kitagawa,日本)、理查德·罗布森(Richard Robson,英国)和奥马尔·亚基(Omar M. Yaghi,美国)3位科学家,以表彰他们“发展了金属有机框架”。诺贝尔化学奖委员会主席海纳·林克评价道:“金属有机框架具有巨大的潜力,为定制具有新功能的材料带来了以前无法预见的机会。”

受中国古代哲学家庄子思想启发

金属有机框架(Metal-Organic Framework, MOF)是一种由金属离子或金属团簇与有机配体通过配位键自组装形成的晶态多孔材料。它们的晶体结构包含巨大的化学空间,气体和其他化学物质可以在其中自由流动。MOF的最大特点是其惊人的比表面积——仅仅一克材料的内部表面积就能达到6000平方米,超过一个足球场的面积。这种多孔特性使MOF成为“会呼吸的材料”。

MOF代表了分子工程学的重大突破。通过改变金属离子和有机配体的组合,化学家可以像搭积木一样,精确设计材料的孔径和功能。这种可定制性使MOF成为化学领域的“万能工具箱”,为材料科学带来了前所未有的设计自由度。

理查德·罗布森在1989年将带正电的铜离子与一个四连接有机分子结合,组织成一个秩序井然、充满空腔的晶体结构。就像钻石中的碳原子一样,它们形成了规整的晶体,但与致密钻石不同,这种晶体含有大量孔道结构。奥马尔·亚基在1995年发表了一种不同二维材料的结构,并创造了“MOF”这一名称。然而,理查德·罗布森的结构相当脆弱,容易散架。许多化学家认为它们毫无用处,但北川进和奥马尔·亚基看到了这些发现的潜力。北川进了解到中国古代哲学家庄子关于“无用之用”的思想,并不认为它们必须有立即可见的用途。1997年,北川进取得了关键突破。他的研究小组使用钴、镍或锌离子和4,4’-联吡啶分子,创造出了具有开放通道的三维MOF。当他们将其其中一种材料彻底干燥后,它依然稳定,并且可以吸收和释放甲烷、氮气和氧气,而形状保持不变。1999年,奥马尔·亚基研发出MOF-5,这是一种极其稳定且空间巨大的框架,获得超过2000平方米每克的比表面积。以此为基础,奥马尔·亚基和北川进等团队继续扩展MOF家族,创造出数万种变体,并应用于气体储存和分离、催化、传感、医疗和环境等各个方面。

持续推动产业发展格局深刻变革

MOF作为一类“分子级乐高”材料,已在解决人类面临的多项重大挑战性问题中展现出实际应用价值。

从未来发展前景看,MOF具备“按需定制”的结构可设计性,通过调控金属中心节点与有机配体的结构,可实现对材料孔径尺寸、功能位点的精准调控,进而开发出适配环保、能源、生命健康等特定领域需求的专用功能材料,推动化工产业向绿色化、精准化方向转型。

更值得关注的是,MOF的研发正与人工智能、超级计算等前沿技术深度融合,传统研发周期长达数年的新型MOF材料,如今可通过计算辅助设计实现高效开发。

(作者:苏州大学讲席教授,获国家自然科学基金青年科学基金项目(A类)资助,苏州大学学位评定委员会副主席)

本版主编 策划 宋广清