

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 138 次

学部工作局科学普及与学术处
《中国科学》杂志社 编报

2023 年 9 月 5 日

“量子材料与智能器件”论坛综述

一、国内外发展现状

人工智能是引领未来的战略性技术，已被众多国家提升至国家战略层面。历经半个多世纪的发展，人工智能研究已进入新的阶段，成为国际竞争的新焦点。然而，目前人工智能的实现均基于传统硅基半导体材料的器件及计算硬件，这些器件的结构、工作原理及连接方式都与生物体中信息处理的基本单元神经元相差甚远。因此，基于传统半导体材料的人工智能技术路线在模拟人脑强大的信息处理能力上面临着诸如集成密度、功耗、智能程度等方面的巨大挑战。不同于传统硬件技术，类脑计算被视为新一代人工智能硬件技术，能够推动人工智能领域的继续发展。未来是否能够真正实现如同人类一样具有获取信息、学习、推理、认知等能力的智能体，很大程度上依赖于我们能否在原子层面构筑出模拟人脑运行基本结构的新原理量子器件及类脑计算硬件系统。因此，类脑计算领域未来的研究和发展强烈依赖于物质科学的基础创新能力。

量子材料研究是当今物质科学的前沿，也是最具发展潜力的基础

研究领域之一，其核心是对各类量子材料体系中电子、光子以及各种准粒子的运动规律进行探索与性质调控。在过去的几十年间，量子材料研究领域获得了长足的发展，已人工构建出多样的材料体系，衍生出众多丰富的物理现象，可用于发展新原理信息器件。这些器件能够被调控出多种不同的功能，包括实现信息存储和计算一体化的功能。此外，基于量子材料的器件具有比传统半导体器件低若干数量级的能耗和更快的信息处理速度，以及前所未有的可扩展性。因此，量子材料器件有望在未来实现超低功耗、超高并行信息处理、超高集成密度的类脑计算芯片。

近年来，国际上已经出现利用量子材料的特殊物性实现类脑计算器件的研究报道。这一高度发展的交叉研究方向正受到欧美发达国家学术界的高度重视，已逐渐成为国际上新兴交叉研究的前沿领域之一。目前，国内多所高校院所在量子材料与量子器件研究领域处于或接近国际前列，包括低维量子体系物性调控与器件实现、强关联电子态量子材料的制备与物理、量子模拟等。同时，国内高校院所在类脑计算器件与系统、神经网络算法等方面也取得了系列重要的研究进展，部分方向已达到与世界一流研究机构“并跑”的状态。然而，到目前为止，量子材料研究与类脑计算研究几乎是独立进行的，并没有形成新的跨学科交叉研究方向，而这往往是取得重大科学发现、在国际上产生引领性和颠覆性原始创新成果的一种非常重要的方式。推动类脑计算与量子材料的前沿学科交叉研究将有助于突破重大原创成果产生的学科壁垒。

二、论坛概况

2023年5月13~14日，中国科学院学部“量子材料与智能器件”科学与技术前沿论坛在苏州举行。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院数学物理学部和学部学术与出版工作委员会承办，南京大学物理学院、《中国科学》杂志社共同协办。中国科学院院士邢定钰和谢

心澄担任论坛执行主席。14名中国科学院院士和来自南京大学、北京大学等近50所高校院所的140余位相关专家学者出席了会议，其中超过半数为45岁以下青年学者，充分发挥了论坛为青年科学家提供学术交流平台的作用。中国科学院学部工作局、国家自然科学基金委员会数理科学部和《中国科学》杂志社相关领导和同志参加了会议。

本次论坛旨在了解量子材料与智能器件领域的最新研究进展，讨论该领域的前沿方向和发展趋势，同时对“目标驱动的基础研究”这一话题进行讨论，希望通过论坛促进国内同行之间的交流和合作，助力我国在“量子材料与智能器件”交叉领域取得发展和进步。论坛重点关注“量子调控与应用”“量子物质与应用”“拓扑物理与应用”等专题，分别围绕“新物态探测、调控与应用面临的挑战”“量子物质的探索与器件应用面临的挑战”“拓扑物理的探索与未来应用面临的挑战”等问题进行了研讨。

三、报告及研讨

（一）主题一：量子调控与应用

中国科学院半导体研究所常凯院士作了题为“光的几何控制：曲率与挠度”的报告。弯曲时空与经典或量子系统的对应是理论物理学的经典方向之一。传统上，研究人员一般基于时空-介质对应实验室环境中模拟强引力场中的量子效应。近年来，光学领域提出了变换光学理论，用坐标变换来设计等效弯曲时空，通过设计、制备电磁参数渐变的光学超构材料可以实现光线传播的任意控制。变换光学不但可以模拟包括黑洞在内的基础物理现象，还催生了一系列以隐身衣为代表的新型电磁器件。此外，坐标变换方案还被推广到声波、水波、弹性波、表面波、物质波、自旋波和热流控制等一系列波动工程领域。然而，变换光学只能用来控制光线轨迹，无法处理电磁波的矢量特性，也不能处理具有旋光性的非互易光学介质。基于此，常凯院士提出可以将变换光学从黎曼几何推广到黎曼-嘉当几何，通过引入挠度张量来

实现光的偏振控制。报告介绍了传统坐标变换方案在光的几何与时空调控方面存在的不足，即无法有效控制光场的偏振状态，这限制了基于变换光学方法的电磁器件设计。因此，常凯院士提出了基于标架变换的广义变换光学理论，并发展出基于黎曼-嘉当时空框架的统一处理方法。具体来说，在一般光学介质中，考虑每一个几何点除具有坐标自由度外，还具有由局域标架代表的内部自由度，用以描述点粒子的旋转、拉伸和扭转，通过旋转可以诱导出磁电耦合项，等价于时空中的几何挠度，该项可以实现对光偏振的控制。他们发现，利用具有局域旋转自由度的电磁连续统，等价于磁光材料（金属或稀薄等离子体、磁性绝缘体、稀磁或铁磁半导体）和磁电耦合材料（多铁材料、拓扑绝缘体及 Weyl 半金属）等非互易光学介质。其中，磁光介质的介电常数与磁导率的反对称虚部和磁电耦合介质的磁电耦合参数带来电磁场不同分量之间的交叉耦合，会产生非互易的偏振旋转，可广泛应用于隔离器和环形器等非互易电磁器件。报告最后进一步指出在时变介质中原则上可以同时产生几何的曲率与挠度，实现对电磁场的光线和偏振态的全方位调控，为新型光学和电磁器件的设计提供理论基础。

中山大学王雪华教授作了题为“室温量子态的实现与操控”的报告。实现量子信息处理的关键是开发可扩展、可集成的量子比特系统以及提升超大容量信息处理能力。为了实现这一目标，需要光子和电子两大信息载体的完美结合，并发展基于室温量子态的量子光电器件。然而，巨大的室温耗散导致量子态难以存活，单辐射子与光子局域模的室温强耦合人造单量子态提供了最具潜力的解决方案。为找到人造单量子态实现的准确条件，王雪华教授与合作者提出光子-激子耦合相互作用的非厄米量子理论，在考虑耗散效应的情况下，得到耦合系统本征态能级和波函数，强耦合的能级劈裂、吸收谱劈裂和辐射谱劈裂的不同临界条件，以及实验探测量子态需要满足的条件。依据这些临界条件，他们将强耦合系统划分为四个不同的区域，其中三个区域已

被实验所验证。王雪华教授进一步指出，实验上实现室温强耦合量子态有两种方案，一种是压缩模体积提高耦合强度克服室温下的巨大耗散，另外一种是利用介质微腔抑制等离子体模的耗散线宽（从 55 nm 抑制到 15 nm 左右）。前者要求非常苛刻的实现条件，如小于 100 nm^3 的超小光子模体积与偶极子取向与电场方向的准直，它们导致强耦合是成功率低于 1% 的偶发性事件。后者极大地放松了强耦合的实现条件，如光子模体积放松至前者的 12 倍，偶极子与电场的夹角可放宽至 70° 左右，从而使单辐射子室温量子强耦合的成功率由不到 1% 大幅提高至约 80%。该方法不仅解决了室温单量子态难以制备的长期挑战，也为严重阻碍等离子体光子学发展的耗散问题提供了可行的解决方案。报告最后讨论了室温强耦合量子态的发展趋势，并指出了四个待解决的关键挑战，包括：室温单量子比特谱劈裂色散测量、室温强耦合荧光光谱 Rabi 劈裂、室温强耦合的单光子 Rabi 劈裂和室温强耦合时域 Rabi 振荡的测量和操控。

中国科学院物理研究所韩秀峰研究员作了题为“新奇磁子量子效应及磁子器件”的报告。传统的电荷流或自旋流在传输过程中，因晶格的散射会产生电阻和焦耳热，导致了半导体芯片中的能耗问题。相比而言，利用磁子作为信息传输的手段，可以降低甚至消除焦耳热问题。此外，磁子作为自旋波的能量量子，具有很长的相干长度。因此，以磁子作为信息的物理载体，在微纳尺度上开发新型磁子器件，有望在存储、传感、信息处理等方面实现不同于传统自旋电子器件的器件功能。面向这一机遇，韩秀峰研究员介绍了他们团队在室温全电学磁子量子调控方面的工作，展示了团队开发的磁子发生器、磁子探测器、磁子/电荷隔离器的器件功能以及磁子器件在传感和存储方向的发展潜力。通过将传统自旋电子学器件中的自旋阀和磁性隧道结与磁子学器件中的磁子阀和磁子结分别进行了对比，指出磁子结具有更小的漏电流和更优的开关比效果。在报告的最后，展示了不同材料体系中磁

子结的物理特性和多样化的用途，并展望了磁子器件的发展方向，指出可借鉴自旋电子器件中的隧穿磁电阻(TMR)、自旋转移力矩(STT)和自旋轨道力矩(SOT)等技术，实现基于磁子异质结核心元器件及磁子转移力矩(MTT)效应的纯磁子流磁子晶体管等原型器件及存储、传感、传输、处理等磁子电路，为未来发展高频器件奠定器件和物理基础。

北京航空航天大学赵巍胜教授作了题为“反铁磁材料及智能器件”的报告。传统智能计算芯片的发展难以满足数据急剧增长的需求，如何利用电子的本征特性设计出新原理器件成为一项重大科学问题，发展具有自主知识产权、跟传统半导体工艺兼容、具有量产潜力的原创“后摩尔”智能器件有望彻底解决当前计算及存储方面的瓶颈。自旋电子器件具备非易失、大容量、超快等“感、存、算”特征，对发展新一代“感存算一体”以及“仿生智能器件”具有显著优势，有望为大数据信息智能时代的发展奠定基础。通过回顾自旋电子技术的发展历程，赵巍胜教授指出，基于反铁磁的自旋器件有望彻底颠覆传统半导体技术，并将器件尺寸微缩至几个纳米的尺度，突破当前集成电路存储器件 10 nm 的瓶颈。报告首先回顾反铁磁自旋电子学的前期发展，介绍反铁磁材料最早被应用于大容量硬盘的自旋阀结构中，利用铁磁层与反铁磁层界面的交换偏置作用，将参考层磁矩钉扎在特定方向。之后，利用自旋轨道矩实现反铁磁磁矩的翻转受到广泛关注并快速发展，被认为有望实现反铁磁自旋电子技术的突破。报告最后对未来反铁磁智能器件的发展机遇做出了展望，指出反铁磁自旋智能芯片能将集成电路、自旋电子学与反铁磁耦合三个诺奖研究方向进行强交叉，是实现大容量、高性能智能芯片的重要路线之一，也是我国研发自主原创存算一体技术的机遇。后续对基于反铁磁自旋电子器件的赋予智能，有望研发出更多存内计算以及神经形态计算相关的反铁磁自旋智能器件。

华东师范大学段纯刚教授作了题为“铁电与铁谷智能材料”的报告。材料自发对称性破缺带来的物理效应是凝聚态物理研究者长期关心的课题，其中时间和空间的反演对称性破缺分别诱导了铁磁性和铁电性，而近期提出的基于电子谷自由度的铁谷性则有多种对称性破缺的起源。谷在物理图像上对应能带中的能量极值点，可被视为一种新型的准粒子，可产生包括谷霍尔效应、圆偏或者线偏选择吸收性等在内的新奇效应。报告首先对铁谷性材料进行了简要的介绍，指出在哈密顿量中引入交换项可让六角晶格谷电子体系中的 K^+ 和 K^- 谷实现能量退简并，从而实现非易失的自发谷极化。接着以 VSe_2 和 $GeSe$ 为例，说明可通过铁磁或铁电诱导实现铁谷态，并展示了这类材料的特殊光偏振选择吸收特性。此外，段纯刚教授还介绍了铁电铁谷材料在实验上的新进展，例如用于激光发射和光致 pn 结的应用，展望了铁谷材料在实现室温量子反常谷霍尔效应和负介电现象方面的潜力，并探讨了铁电及铁谷材料在类脑器件领域的前景，例如利用铁性忆阻器连续变化的中间态表达准连续权重，通过模拟突触连接来构建类脑硬件，从而实现对外界的响应和神经运算。最后，段纯刚教授介绍了目前铁电突触器件的发展，强调其具有可吸收光自供电、可处理动态信号、广泛的工作温度范围等优势。

（二）主题二：量子物质与应用

中国科学技术大学陈仙辉院士作了题为“量子物质中的演生现象及应用”的报告。量子材料是由上个世纪八十年代提出的量子霍尔效应系统和强关联体系中的铜氧化物超导体等“关联电子材料”概念扩展而来的，主要具有量子拓扑和强电子关联等物理特性，目前包含拓扑材料、新型磁性材料、多铁材料等材料体系。这些体系中存在复杂的相互作用（如电子强关联作用、量子纠缠以及多自由度耦合），往往表现出丰富的演生现象（如高温超导电性、巨磁阻效应、多铁性、量子霍尔效应和各种电子自由度的有序态等）以及各种各样的新奇准

粒子激发(如外尔费米子、马约拉纳费米子、磁单极子和斯格明子等)。报告指出,对量子材料中演生现象的研究将会极大促进人们对物质世界的认识,产生许多物理学最新的前沿方向,为在光学探测、电子信息和能源相关方面面临的瓶颈问题提供新的解决思路。围绕这些方面,首先介绍了现有信息技术的背景,指出现有的逻辑运算芯片已面临摩尔定律逼近极限的挑战,半导体集成电路已进入亚十纳米技术节点,接近物理极限,现有硅基芯片技术存在功耗瓶颈。这些挑战和瓶颈使我们急需发展新一代低能耗信息技术。相比于仅利用电子电荷属性的传统半导体电子学,基于量子材料的自旋电子学、拓扑电子学等有望发展为新一代低能耗信息技术。例如类石墨烯的二维半导体量子材料表现出奇特的量子效应以及优越的电学和热学效应,已成为半导体研究的新方向;超导体隧道效应可实现超导电子学、超导量子计算等应用;低维拓扑超导体中产生的马约拉纳费米子能用于受拓扑保护的拓扑量子计算等。报告进一步指出,高性能计算问题的挑战在于功耗、空间和冷却,而超导计算机的速度和能耗远优于现有半导体集成电路,并且与现有半导体工艺兼容,可以帮助解决这些挑战。最后,报告回顾了人类文明从“石器”时代到“青铜”时代再到现在的“硅基”时代的发展演化,指出材料对于人类文明进步的重要性,并展望了量子材料在推动人类文明进一步发展方面的重要潜力。

北京大学王健教授作了题为“二维超导中的新奇量子物态”的报告。在二维超导及其相关异质结的物性研究领域,不断涌现出新的突破,已经成为探索和操控新奇量子物态的重要前沿。当一个超导体样品在其中一个维度上的尺寸小于库珀对的相干长度时,可以将其视为二维超导体。王健教授提到,根据 BKT(Berezinskii-Kosterlitz-Thouless) 拓扑相变理论,在二维超导体中涡旋与反涡旋配对后,超导的准长程序仍然存在,为二维超导的相关研究奠定了理论基础。报告首先介绍了在镓薄膜中发现的量子格里菲思奇异性这一新量子相变行为,该实

验首次在二维超导体系中观察到动力学临界指数发散的特征，发现其中无序起到了重要作用。他们进一步在一系列二维超导体系中证实了量子格里菲思奇异性在二维超导量子相变中的普适性。报告还介绍了二维超导体中反常金属基态的研究。通过极低温电输运实验，在周期性孔洞阵列调制的高温超导 YBCO 薄膜中证实了二维反常金属态的存在，并通过对库珀对量子振荡的系统性研究，证实了该反常金属态是一种玻色金属态。进一步对单晶超导薄膜和器件展开极低温下的高精度测量，证实了反常金属态确实是一种本征的基态。王健教授指出，二维超导已成为研究拓扑超导与量子计算的重要平台之一，他回顾了二维超导体系中对马约拉纳零能模的理论预测与实验探索，并介绍了在 $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}/\text{STO}$ 高温超导薄膜的磁性增原子上以及一维原子缺陷链两端观测到的零能束缚态。最后，总结并指出二维超导为研究量子相变以及新奇物态提供了一个良好的平台，展望二维超导材料将成为超导走向信息领域的一个重要发展方向。

北京大学陈剑豪教授作了题为“低维自旋激发及其器件应用进展”的报告。磁振子器件可用于制备新一代的自旋阀器件，在实现自旋逻辑门的应用上具有广阔前景。磁振子器件分为相干型与扩散型两类器件。相较于相干型磁振子器件，扩散型磁振子器件具有激发频率无限制、尺寸小和与电荷逻辑的兼容性等诸多优势，并可通过磁场控制实现开/关两种状态。报告首先介绍了 MnPS_3 材料体系中电调控的磁振子阀研究结果，这种磁振子在 MnPS_3 中的可调性约为铁氧体 YIG 体系的 5000 倍。这一实验现象与二维磁振子激发的非线性自旋塞贝克效应相关，并被证实可用来实现电调控的二维磁振子非门。报告还介绍了具有面内各向异性的 CrPS_3 体系，展示了基于该体系的电调控各向异性磁振子阀的研究结果，并进一步实现了只读存储器。在自旋关联体系的自旋输运方面，详细介绍了在 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 材料中由 Gd^{3+} 离子组成的自旋环及其 “director” 态的工作，研究表明该体系存在两种

不同的自旋输运行为（自旋输运的正常态和反常态），发现这两种态在温度、磁场和输运距离的变化下表现出明显的差异性。最后指出，在低维磁有序系统中实现完全电调控对开发磁振子非门器件的重要作用，并对基于低维自旋激发的电路设计、阻挫/量子自旋体系的自旋输运以及相位相干的自旋激发调控等在内的研究方向进行了展望。

北京大学刘开辉教授作了题为“大尺寸二维单晶的研究进展”的报告。作为一种重要的量子材料，二维材料具备独特的物理性质，兼容现代硅基芯片工艺，有望实现规模化应用，成为凝聚态物理、光学、信息、材料、化学跨学科交叉研究的热点材料体系。大尺寸二维材料单晶生长技术能够提供具有高度一致性的材料性能，避免由缺陷、晶界带来的材料性能劣化，是二维材料实现高端应用的基石。报告指出，由于二维材料只有原子级厚度，其单晶制备的核心是表、界面原子的精准调控，以及原子的有序排布和可控堆叠，因此传统的体单晶生长方法不完全适用于二维单晶的制备。围绕如何在面内实现“米级”二维材料单晶这一核心挑战，介绍了单核唯一长大和多核协同生长两种研究思路。回顾了团队在单核生长大面积石墨烯单晶的工作，概括了多核协同生长的物理基础和控制关键，并总结了表面晶格周期势外延生长米级单晶石墨烯、表面原子台阶外延生长分米级单晶氮化硼等多核协同生长的工作。此外，对于如何在面外实现叠层单晶这一难题，介绍了堆垛控制和厚度控制两种研究思路，包括成核控制、耦合锁定等堆垛控制策略和原子连续运输这一厚度控制策略。最后，展望了大尺寸单晶在多个领域的应用前景。他指出，二维单晶的生长有巨大的研究空间和潜力，可应用于电学、光电子学和声学等领域，基于多种二维单晶和复杂异质结构的制备，有望在未来推动非线性光学晶体系统的发展。

南京大学缪峰教授作了题为“面向未来计算的二维材料与‘原子乐高’研究”的报告。人类文明正进入智能时代，产生的数据量和对

应的计算需求呈指数级增长。而传统计算硬件所能够提供的计算能力（算力）增长缓慢，导致了计算需求与算力之间存在巨大缺口，这是智能时代面临的巨大挑战之一。对于未来计算技术，急需换道发展，探索能够打破冯·诺依曼架构瓶颈的新计算范式，并建立对应的物质和材料基础。报告指出，现实中的信息通常表现为可变化的物态，信息处理（计算）的物理过程可视为“物态调控”的过程。探索和构建新型量子材料，研究其新颖物态和量子调控方法，是发展新一代智能硬件技术的物理基础。面向上述挑战与机遇，提出了新的技术路线，即利用二维材料作为未来的基础电子与光电子材料，将不同的二维材料作为基础组成单元，通过可控的“原子乐高”构建方式，构筑众多具备原子尺度和丰富功能的垂直异质结，实现新原理器件开发。报告重点展示了二维材料物态调控与基于“原子乐高”电子学的计算技术在未来发展中的机遇，并着重介绍了二维材料在神经形态计算和固态量子模拟领域的应用。同时，还展望了二维材料在未来计算方面的发展方向 and 潜在技术路线，涵盖了二维材料与“原子乐高”的物性调控、新原理计算器件、阶段性系统应用三个方面，指出该领域关键科学问题包括物理自由度的选择与调控、器件状态变量的选择与工作机制、和高能效信息计算架构与系统等。最后总结并指出，实现基于量子材料物态调控的未来计算技术，关键在于寻找适合的材料体系和物理机制，二维材料因为具有丰富物态和易调控性展现出巨大的发展潜力，未来需要在材料制备、物态调控、新原理器件、架构与系统设计等方面开展研究，逐步推进未来计算领域的发展。

（三）主题三：拓扑物理与应用

上海交通大学/南方科技大学贾金锋院士作了题为“拓扑超导与拓扑量子计算”的报告。马约拉纳零能模作为一种非阿贝尔任意子，在可容错量子计算中具有重要意义。近年来，拓扑绝缘体表面态、铁基超导体、拓扑晶体绝缘体中的谱学证据，展示了拓扑超导体是探索

马约拉纳零能模的理想平台。报告介绍了在 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{Pb}$ 异质结中近邻效应诱导出超导能隙的实验数据，并在超导能隙中发现了多个由自旋极化的表面态与体态超导态相互作用产生的电子态。在实验中，进一步在 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 的涡旋中观测到马约拉纳零能模的存在，并推测可能存在多个马约拉纳零能模。通过施加倾斜磁场，他们发现只有当磁场水平分量不平行于 $\{110\}$ 镜面时才会产生零偏压峰劈裂，展示了 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 材料是研究马约拉纳零能模相互作用及调控的理想平台。贾金锋院士进一步提出，拓扑绝缘体/超导异质结在水平磁场下实现分段费米面获得的超导二极管效应，可用于构筑低能耗超导计算机。报告梳理了从马约拉纳零能模到拓扑量子计算的关键技术节点，总结了在包括材料生长、编织门操作和读取、量子比特制备方面的关键系统和技术创新，并展示了使用探针实现涡旋移动的能力和通过电控马约拉纳零能模移动实现编织的方法，讨论了目前在编织门操作上存在的问题。最后，展望了拓扑量子计算广阔的发展前景，指出我国在马约拉纳零能模研究方面有良好的基础，未来实验验证马约拉纳零能模非阿贝尔特性是关键所在，不仅需要多方面人员协同攻关实现马约拉纳零能模精密操控技术，还需要采用多种精密测量仪器实现对编织结果的测量。

复旦大学张远波教授作了题为“本征磁性拓扑材料中的新机遇”的报告。拓扑与磁性的耦合可以产生新奇的量子态，例如量子反常霍尔绝缘体和轴子绝缘体。这类兼具磁性和拓扑性的材料最早通过在拓扑绝缘体中掺杂磁性原子实现，然而，随机分布的磁性掺杂原子会引入杂质散射，阻碍对材料中拓扑量子效应的进一步探索。近年来兴起的本征磁性拓扑绝缘体，无需掺杂即可具有内禀磁性和拓扑特性。目前，这类材料包括 MnBi_2Te_4 、转角石墨烯以及转角过渡金属二硫族化物等，它们的出现有望进一步推动拓扑量子效应的研究。报告重点介绍了以 MnBi_2Te_4 为代表的本征磁性拓扑材料的相关研究工作。目前，

在这类材料上已经实现了零磁场下的量子反常霍尔效应的观测，同时还有一些研究正在推动向轴子绝缘体和高陈数态发展。在未来的研究中，这类材料具有以下三方面的机遇和挑战：首先，预计可合成更多具备理论预言特性的类似材料，这些材料可能拥有更高的铁磁转变温度和更大的量子反常霍尔能隙，从而能够提高量子反常霍尔效应的温度；其次，磁性拓扑绝缘体的实现可带来手性边态的传输模式，这一传输模式受到拓扑保护，可实现无杂质散射的拓扑量子器件；再次，将这种手性边态传输模式与超导性相结合，通过近邻效应等耦合方式，有望实现拓扑超导态，这对于构建量子计算器件具有重要意义。最后指出，还有待进一步探索更为新奇的分数量子霍尔效应，这种分数化的量子物态可能是整个量子霍尔材料家族共同的追求，如果能够实现对分数量子反常霍尔效应的稳定操控，将极大推进拓扑量子比特理论设想的实验验证进程，并引发对更为新奇物理现象的探索。

中国科学院物理研究所方辰研究员作了题为“磁性拓扑理论进展”的报告。拓扑能带理论的发展，是一部由能带的对称群、群表示和拓扑不变量组成的“三重奏”。报告首先回顾了非磁性拓扑材料中，这三方面的理论研究如何相辅相成，产生了一大批领域内知名成果，如早期的 Z_2 拓扑绝缘体和近年来的高阶拓扑绝缘体等。磁性材料的本质属性是低温下磁结构的出现，磁结构一方面破坏了原有的时间反演不变性，同时建立了以“磁空间群”“自旋空间群”为主的新的对称性。方辰研究员以这两类对称群为线索，介绍了近年来磁性拓扑物理理论的进展。首先，作为描述磁结构完整对称性的自旋空间群理论，其群结构的枚举已被完成，其总数达数万种，远高于空间群的 230 种以及磁空间群的 1651 种，显示了磁结构对称性的丰富程度；其次，自旋空间群的表示理论已经部分建立，这一理论揭示了一些磁结构中所特有的费米子激发，并提出了其所伴随的“交互拉莫尔进动”等新物理效应；最后，1651 个磁空间群所保护的拓扑绝缘体分类，以及基于

“对称性指标”的拓扑诊断理论已经完成，可以用于任何磁性材料中能带拓扑性质的快速计算。最后认为，磁性材料中更为丰富的对称性必将带来复杂和有趣的新拓扑结构。

南京大学刘俊明教授作了题为“PFM 针尖下的铁性拓扑畴材料”的报告。对于铁性材料而言，压电力显微镜（PFM）是集探测、成像和操控于一体的重要表征技术，为畴结构成像提供了良好平台。通过在探针和样品之间施加交变压电驱动电信号，不同电畴区域将以相同或相反的相位发生膨胀和收缩，导致探针悬臂梁的形变，通过提取响应的振幅和相位信号可用来表征铁电畴的面内面外极化，分辨率可达到 30 nm 以下。报告提出了“功能基元 + 序构 = 新器件”的思路，以铁电畴为基本单元，通过外加电场对畴区进行操纵和翻转，实现拓扑新功能的目标。进一步介绍了在 BiFeO₃(BFO)铁电薄膜中利用 PFM 针尖写入拓扑保护的铁电中心畴的方案，展示了铁电中心畴的拓扑稳定性与读写重复性。报告指出，对于针尖表征技术而言，铁电器件的质量极为重要。为了提高器件结构的质量使其符合实际需求，该团队进一步发展了新的制备技术，以避免刻蚀对铁电薄膜的质量造成损害，为实现基于薄膜布线的直接制造和规模集成提供必要技术基础。同时还在三维集成方面进行了探索，实现了阻态开关具有百万次的读写能力和稳定性的器件单元，并进一步展示了对神经元突触效应的模拟。报告展望了该领域未来的发展，指出将针尖技术手段和器件制备新工艺应用到包括磁电耦合材料、铁电半导体、铁磁体等材料体系中，将对发现更多新奇衍生现象具有重要的推动作用。

四、共识与建议

此次论坛围绕“新物态探索、调控与应用面临的挑战”“量子器件的探索与器件应用面临的挑战”“拓扑物理的探索与未来应用面临的挑战”三个论题进行了讨论。与会专家踊跃发言，提出了诸多见解和看法，并达成共识，认为通过开展量子材料新奇物性和新原理器件

的交叉融合研究，有望推进我国未来智能技术的发展。

关于“新物态探测、调控与应用面临的挑战”：

与会专家强调了产业化和技术迭代的重要性，指出只有将应用落地并实现产研结合，才能推动技术进步。专家们探讨了拓扑物性在不同领域的器件应用，包括实空间拓扑应用于量子点激光器，以及拓扑半金属应用于传感器、催化和拓扑量子计算等。指出，在考虑基本的拓扑物态时，要明确能够实现的目标，制定好整体规划，全局设计，再努力去实现。围绕概率计算，专家们讨论了自旋电子学的可能应用前景，包括概率计算的历史沿革和优势，并提出发展建议，包括将概率计算的理论和算法拓展成更通用的形式，明确算力与比特数目之间的关系，以及发展概率计算所需要的新算法等。

此外，与会专家还为类脑计算发展提出多个建议，包括如何在规模上实现类脑计算，如何实现不同维度（视觉、听觉、嗅觉等）的认知和联系，以及如何从更高的角度出发，通过单个器件协同实现多个功能。

关于“量子器件的探索与器件应用面临的挑战”：

类脑器件是光子、电子的行为，人脑是复杂的蛋白和灰质，类脑器件怎么和大脑复杂的机制相比拟？针对这一问题，专家们指出不管是类脑还是仿脑，其出发点都在于利用目前对大脑的理解来解决一些具体的问题。对于类脑智能的发展趋势，多位专家形成共识，指出信息学到类脑智能的发展可被视为从传统的符号处理方法向仿生智能的转变。建议发展的关键技术包括更深层次的网络结构、更高效的训练算法和更好的理解神经网络的工作原理，更复杂和精确的神经计算模型，更高性能和低功耗的神经芯片设计，以及更深入的认知科学研究和更高级别的脑-机接口技术等。

传统器件中的不利因素在类脑器件领域有没有可能是有利因素？针对这一问题，专家以概率计算为例，建议在类脑器件领域，将传统

器件中的噪声等不利因素转化为有利因素。类脑器件的概念能否超出固体物理的范畴，向固、液体系拓展？对神经元更深层次的研究对发展固、液类脑计算器件有什么启发？针对这一系列问题，专家们经过讨论达成共识，指出首先需要找到合适的应用场景来发展固、液体系，同时需要深入研究神经元的更深层次特性，例如生物化学和电生理过程，进而启发设计更精确和高效的固态和液态类脑计算器件。

关于“拓扑物理的探索与未来应用面临的挑战”：

如何确定马约拉纳零模是否总是成对出现吗？怎么同时探测两个马约拉纳零模？有没有只存在单个零模的证据？针对这些问题，有专家建议在实验上开发超高精度的测量和控制来实现两个马约拉纳零模的同时探测。在未来的信息应用场景中，我国科学家在马约拉纳零模的研究方向上已经提出了一些创新的想法，如量子计算和量子通信、拓扑量子存储器等。现场还讨论了量子反常霍尔效应在应用方面的潜力，展望了低功耗电子器件、量子计算等具体应用场景。

围绕大规模集成铁电畴对类脑计算方面的应用潜力，以及在密度、能耗方面的优、劣势等问题，与会专家展开了讨论并指出，大规模集成铁电畴除了在神经元类脑计算中的应用外，还有其他潜在的用途，包括存储器和逻辑器件、忆阻器和人工神经元、数据处理和计算等。对铁电畴，有专家指出，其大规模集成所具有的优势包括高集成度、非易失性、快速响应，同时也存在一些劣势，例如制造复杂、读取和切换操作可能导致额外的能耗、长期可靠性和稳定性等问题，未来需要加强与神经生物学相关领域开展交流研讨，通过进一步开发原型器件和实验验证来展示大规模集成铁电畴的应用潜力。

本次论坛总结并凝练了量子材料与智能器件研究领域的科学前沿问题，探讨了潜在的应用出口方向，促进了相关学科的交叉融合。论坛最后对“目标驱动的基础研究”这一话题进行了详细讨论，并对未来的产学研结合、科技创新与成果转化的发展布局进行了展望。与会

专家学者各抒己见，前瞻性地分析了该领域中长期发展趋势，凝练了未来该领域有望取得重大突破的前沿科学问题和研究方向，进一步深化了未来基于量子材料的智能器件的发展战略。

本次论坛肯定了我国在量子材料与智能器件研究中取得的一系列显著的进展，以及与国外同领域的研究相比，我国在一些方面具备的优势，包括技术实力、基础设施、政府支持和投资、人才培养和团队合作等方面。同时，我国在该领域的研究涵盖了从理论模拟到材料设计和制备，再到器件开发和应用的全过程，体现了出色的综合研究能力，促进了不同学科领域之间的交叉与融合，为量子材料与智能器件的发展提供了更多可能性。同时，与国外同领域的研究相比，我国在一些方面还面临挑战，例如基础研究水平仍然有差距、创新速度和技术转化仍然不足等。这需要继续加强基础科学研究，攻克关键技术，提升科研原创能力，加强高校、科研院所与企业之间的合作，加强技术转化和促进商业化。

量子材料的新发展有望为解决若干人类社会面临的重大前沿科学技术问题提供超越经典极限的途径，从而为物理、化学、生物与材料科学等基础科学领域实现颠覆性突破提供物质载体，并对推动量子计算、通信、新型器件、能源转换和存储等应用科学领域的发展产生广泛而深远的影响。此次论坛围绕量子材料与智能器件前沿科学问题开展学术分享与讨论，探讨未来研究发展方向及面临的挑战与机遇。论坛的成功举办或将促进量子材料领域的学术交流，加快基础研究和关键技术攻关，坚持创新驱动、坚持目标导向，推动国内相关领域的高水平科学研究与科技成果转化。

（作者：缪峰，南京大学物理学院/类脑智能科技研究中心教授）

联系方式：中国科学院学部工作局科学普及与学术处，010-59358336