

· 专题:交叉科学前沿与发展 ·

自旋交叉科学研究

杜江峰* 张琪 居琛勇 荣星 石发展 陈三友

中国科学技术大学 中国科学院微观磁共振重点实验室,合肥 230026

[摘要] 自旋是自然界粒子的基本属性,在现代科技如磁共振影像、磁存储中有着重要应用。近三十年来,随着实验技术的巨大进步,人们对自旋的调控达到了新的高度,现已能在微观尺度上对少量乃至单个自旋进行高精度地控制和测量,为开启全新的自旋应用带来了重大机遇。通过发展新颖的具备变革性特征的自旋科学技术,有望促成前沿交叉科学研究中的重大突破,并催生出一批有可能对人类社会带来深远影响的重要科技。自旋交叉科学的研究已在世界范围内得到高度重视,呈现出各国激烈竞争的局面。本文简要介绍了该领域的主要研究进展、关键问题和发展趋势,并对国际竞争中我国如何巩固和扩大在该领域的优势给出了一些政策性建议。

[关键词] 自旋;交叉科学;量子调控;微观磁共振;自旋传感器

1 自旋交叉科学研究的背景和意义

电荷与自旋是自然界粒子的两个基本属性,例如电子就同时具备电荷与自旋。电荷与电流密切相关,自旋与磁性深刻关联。鉴于电与磁在现代科技中的广泛应用,可以说,电荷与自旋构成了现代科学技术的物理基础。相对而言,当代社会中电荷的应用更为普遍。例如二十世纪的重大发明——半导体、晶体管和集成电路,都利用了电子电荷这一属性,它们深刻改变了人类文明的面貌。此外如智能电网、医疗电子、汽车电子等也已成为现代社会的支柱。

相比于电荷两千余年的研究史,自旋的研究发端于20世纪20年代,时间相对较短。但自其发现以来,自旋相关的基础科学突破和交叉领域技术突破已获得14次诺贝尔科学奖,一些应用如医学磁共振影像、磁盘与磁存储等已对人类社会产生了重要的影响。以磁共振技术为例,自20世纪20年代斯特恩等从实验上观测到自旋现象以来,围绕自旋磁共振方法、技术和多学科领域的交叉应用,人们已获得数次重大科学技术的突破,先后颁发了3次诺贝尔物理学奖、2次诺贝尔化学奖和1次诺贝尔生理学奖。当前,磁共振技术已经成为最为重要的科学



杜江峰 中国科学技术大学教授,中国科学院院士。主要从事自旋量子物理及其应用的实验研究。创新发展了自旋量子调控及动力学解耦等实验技术,结合系列高性能磁共振实验装备的成功研制,将自旋磁共振的灵敏度和分辨率提升到国际领先水平,在前沿交叉研究领域取得了具有重要国际影响的研究成果。发表学术论文200余篇。获国家自然科学奖二等奖、教育部自然科学一等奖、中国物理学会黄昆物理奖、何梁何利科学与技术进步奖、周光召基金会“基础科学奖”等奖励。

研究手段之一,也是一大重要的科学领域。

当前已有的自旋应用主要是基于对宏观尺度上大量自旋集体效应的被动观测和直接利用。现代科学发展的一大趋势,是从宏观向微观拓展。特别是近三十年来,随着实验技术的巨大进步,人们对自旋的调控达到了新的高度,现已能在微观尺度上对少量乃至单个自旋进行高精度地控制和测量,为开启全新的自旋应用带来了重大机遇,例如单分子磁共振、新型磁存储、高精度自旋陀螺仪、磁异常探测等。这些新发展取决于自旋调控技术的进步以及其在物理、生物、材料等学科领域的交叉应用,将通过交叉科学研究诞生重大基础科学突破,并最终发展出有重大应用前景的新型自旋科学技术。人们期待,自

收稿日期:2021-03-07;修回日期:2021-03-12

* 通信作者,Email: qcmr@ustc.edu.cn

旋开启的新一代科学技术将对人类文明的进程带来新的飞跃,其贡献将不亚于电荷。

自旋交叉科学的巨大潜力,已经在世界范围内引起高度重视。欧盟和英国在其近五年的主要科学研究计划中均把自旋交叉科学作为重点支持方向。美国在 2018 年 9 月 13 日通过立法制定了一项为期 10 年的国家科技创新计划,总投入 13 亿美元,将开发微观自旋体系用于生物医学、不依赖 GPS 的导航和其他应用的精密测量变革性技术作为三个支持领域(精密测量、通信、计算)中的第一个。2018 年 9 月 24 日,美国白宫举办峰会,政府和科技企业巨头悉数出席,发布国家级科技战略概述。美国能源部和国家科学基金会合计拨款 2.49 亿美元,撬动企业资金,实现联合研发。

在我国的《国家中长期科技发展规划纲要》中,基于自旋的量子调控也是重要的研究方向。近年来,在国家自然科学基金委员会、科技部、中国科学院等资助下,我国科学家在自旋交叉科学研究中取得了较好的进展,在这一新兴领域到达了整体并跑、部分研究方向领跑的研究水平。

以下我们就对自旋交叉科学研究中的主要科学技术、交叉研究进展、关键问题和发展趋势等做一简要的综述。

2 自旋调控及相关变革性技术的研究进展

近三十年来,随着光学共聚焦、扫描探针、单电子晶体管等新兴检测技术的进步,一些具有光泵磁共振、自旋电荷转化等新颖特性的自旋体系被发现和研究,对自旋的测量和调控开始深入到纳米尺度甚至单自旋水平。以单自旋作为基础逻辑比特单元,蕴含着颠覆传统计算的巨大可能。德国斯图加特大学 Wrachtrup 组首次利用共聚焦技术观测到单个钻石氮空位(NV)中心的自旋磁共振谱^[1],演示了对 NV 的自旋态调控^[2],引发了该方向的研究热潮。目前该方向自旋态操纵速度可以超过 GHz,最高纪录由美国芝加哥大学 Awschalom 组保持^[3]。自旋态调控保真度方面,中国科学技术大学杜江峰组于 2009 年原理性地展示了高阶自旋动力学解耦技术^[4],2015 年将动力学解耦技术与自旋比特逻辑操作结合起来,实现了单比特保真度 0.99995,双比特保真度 0.992,是固态自旋体系的最高纪录^[5]。在 NV 中心取得系列突破的带动下,其它新型固态单自旋体系也快速涌现,如金刚石中的 SiV 中心、硅中稀土离子、碳化硅中的各类发光缺陷、六方氮化硼等范德瓦尔斯晶体中的新型发光缺陷等,并且已经在

基础物理验证、新型通信、计算、精密测量等领域展示出诱人前景。

基于上述对新颖自旋体系调控能力的进步,人们逐步发展出了具备变革性特征的新型自旋科学技术,其中主要的介绍如下。

2.1 微观磁共振波谱学和成像

自旋磁共振技术包括磁共振波谱和磁共振成像,是研究自旋的通用手段,也是最重要的自旋应用之一。传统自旋磁共振技术的灵敏度和分辨率受限于电磁感应的探测原理。因磁共振成像研究成果获得 2003 年诺贝尔生理医学奖的 Peter Mansfield 曾撰文论述,目前依赖线圈探测的磁共振成像分辨率极限只能达到 1 微米^[6]。

2008 年德国斯图加特大学 Wrachtrup 组和美国哈佛大学 Lukin 组提出以 NV 作为原子尺度传感器代替传统线圈^[7,8],有望实现纳米尺度上的磁共振。2013 年初 *Science* 同期发表了两篇研究论文,报道了纳米尺度上实现质子核磁共振探测,开启了这一方向的实验研究先河。其中一篇是德国斯图加特大学 Wrachtrup 组与中国科学技术大学杜江峰组的合作研究成果,实现了 5 纳米尺度内约一万个质子的核磁共振谱学^[9];另一篇来自美国 IBM 实验室的工作则实现了 24 纳米尺度样品的质子核磁共振探测^[10]。2014 年,德国乌尔姆大学 Jelezko 组与中国科学技术大学杜江峰组合作,进一步将磁共振的灵敏度推进到单核自旋^[11]。

传统磁共振无法实现对单个分子的测量。中国科学技术大学杜江峰组瞄准单分子物质科学研究的重大前沿,在单分子磁共振上取得了重大突破。他们采用前述微观磁共振原理,结合自主发展的高阶动力学解耦实验技术、高精度单自旋调控技术,有效抑制了噪声影响、显著提升了探针态制备和读出性能,于 2015 年测得了国际首张单蛋白质分子的电子顺磁共振谱^[12](图 1)。该工作是对传统磁共振的革命性突破,首次成功地将磁共振灵敏度从传统的百亿分子推进到单个分子、分辨率从毫米推进到纳米,标志着在纳米尺度上进行磁共振探测、无损地获取单个分子的空间定位、结构和构象变化信息成为现实。与超高分辨荧光显微技术(2014 年诺贝尔奖)相比,单分子磁共振不仅同样能提供纳米分辨率空间定位信息,还能进一步解析出单个分子的结构并研究结构与功能的关联,具有广泛应用前景。工作在国际学术界引起很大反响。*Science* 杂志将该工作选为研究亮点并配发专文报道,称该工作“实现了一个崇高的目标”“可以有效克服以往测蛋白分子结构时需要提纯和长成单晶的困难,实现对单蛋白分

子在细胞内的原位检测……,是通往活体细胞中单蛋白分子实时成像的重要里程碑”。

在上述工作基础上,中国科学技术大学杜江峰组进一步实现了水溶液中单个 DNA 分子磁共振谱的探测^[13](图 2)。水溶液是进行生命活动、保持生物活性所必须的生理环境,获取其中单个生物分子的磁共振谱,是朝向研究单个具有功能活性的生物分子迈出的重要一步。水溶液中的单分子顺磁信号不稳定且在快速扩散,因此实现水溶液中的单分子磁共振谱学要解决两个问题:一是提高探测效率缩短探测时间,二是在不影响分子活性前提下阻止其游离探测视野导致信号丢失。中国科学技术大学组发展了金刚石微纳加工和微波操控技术,提升探测效率一个量级,将探测时间从小时缩短到几分钟;为克服生物分子在水溶液中游离导致信号丢失的困难,将待测 DNA 分子用化学键合的方式拴在金刚石表面上,最终成功测得水溶液中单个 DNA 分子的磁共振谱。通过对谱线形状和频率位置变化的计算分析得到其约 1 纳秒的运动特征时间和疏水性环境等信息。该工作使在水溶液环境中甚至细胞原位研究单个生物分子的结构、功能和动力学成为可能,解决了单分子磁共振技术生物应用的关键问题。该成果被 *Nature Methods* 选为五篇封面标题文章之一。

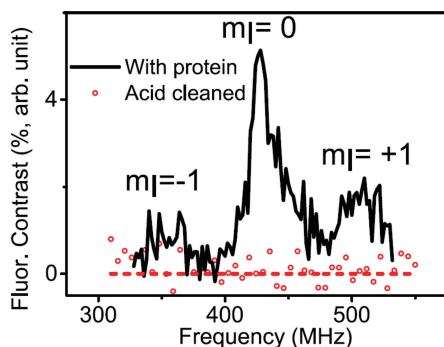


图 1 单蛋白质分子电子顺磁共振谱

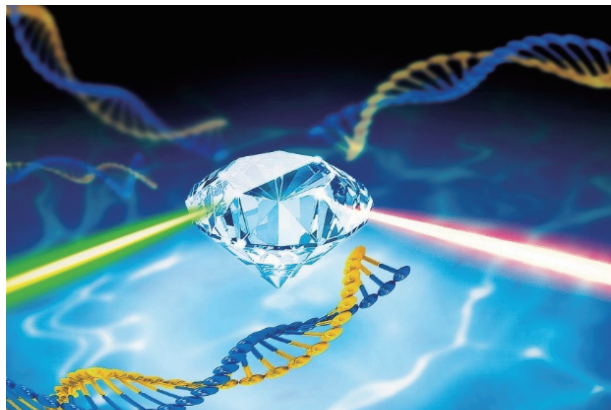


图 2 金刚石 NV 色心实现水溶液单分子谱学探测示意图

国际上也对单分子磁共振进行了跟进研究。2016 年美国哈佛大学 Lukin 组实现了对单个蛋白质分子的核磁共振探测和谱学分析^[14]。目前,研究人员仍在不断深入研究这一变革性的磁共振技术。德国斯图加特大学 Wrachtrup 组、德国乌尔姆大学 Jelozeko 组、瑞士苏黎世理工大学 Degen 组、美国哈佛大学 Walsworth 组,分别在 *Science* 和 *Nature* 上报道了实现超高谱线分辨率的微观核磁共振,展示了在纳米至微米尺度检测化学位移和交换耦合强度的优异性能^[15-18]。中国科学技术大学杜江峰组提出并实验实现了纳米级零场顺磁共振谱学方法^[19];基于这一方法实现了 9 kHz 谱线分辨率的单自旋顺磁共振谱,将谱线分辨率提升约 30 倍,是基于金刚石单自旋传感的顺磁共振谱学分辨率最高指标^[20]。2019 年荷兰代尔夫特理工大学 Taminau 组探测并分析了金刚石内部含有 27 个 ¹³C 的核自旋簇,原理性地展示了利用 NV 传感器实现原子级别的核磁共振结构解析^[21]。

在磁共振成像方面,其在设备和技术上与谱学略有差别,通常采用扫描探针显微成像模式,用原子力显微镜驱动微纳加工得到的金刚石探针扫过样品表面,可以实现纳米级空间分辨率的磁成像。由于金刚石量子传感高灵敏度的特点,可实现对二维甚至单层薄膜材料的高空间分辨率成像。德国斯图加特大学 Wrachtrup、美国 IBM 实验室 Rugar 组实现了对核自旋十纳米级分辨率的成像^[22-24]。美国哈佛大学 Yacoby 组实现了亚纳米级分辨率的单电子自旋顺磁共振成像^[25]。中国科学技术大学杜江峰组实现了对微波场的宽场矢量成像^[26]和细胞原位铁蛋白分子的纳米磁成像^[27]。此方向从原理到研究进展等的更详细介绍可参见发表在《物理》的综述^[28]。

2.2 变革性精密传感技术

除了对微观磁共振带来的颠覆性提升,新型自旋传感器也在其它精密传感领域有着巨大潜能。其核心优势在于纳米尺度下对磁、电、温度、压力等多物理量的超灵敏检测。其具有的纳米到微米尺度的检测能力,对先进制程芯片无损检测、表征新型自旋电子学材料及器件结构、神经网络活动成像、生物磁导航研究等至关重要。

当前集成电路先进制程工艺中,晶体管的一些特征尺寸已经小于 10 纳米。而作为传感器的固态单自旋只有原子级大小,能够以超高分辨率用于先进芯片的无损检测,表征晶体管运行过程中的电场、

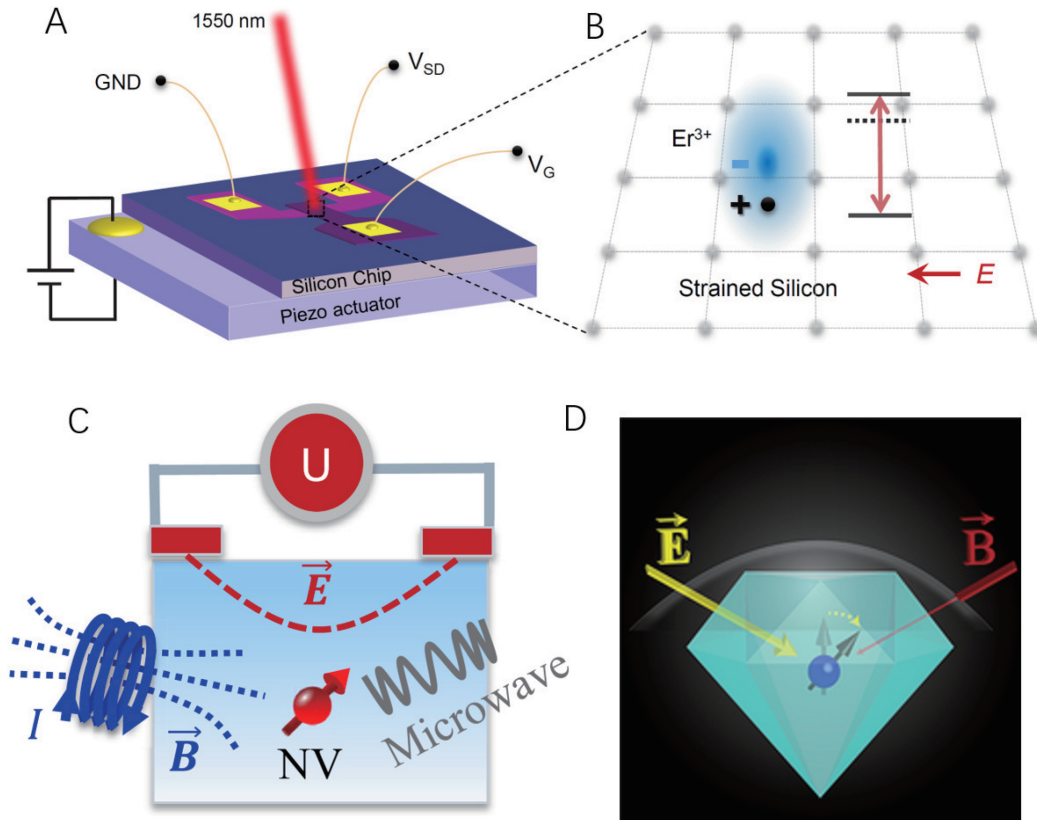


图 3 原子级精密电场传感

(A) 栅式场效应管；(B) 稀土离子传感器检测场效应管内部电场和应变；(C) 钻石内 NV 传感器同时接收电场和磁场信号；(D) 通过自旋调控技术，屏蔽磁噪声干扰，只接收电场信号。

电流、应变及温度分布。2019 年中国科学技术大学杜江峰组与澳大利亚新南威尔士大学合作利用单个稀土离子作为原子传感器，实现纳米晶体管内部电场和晶格应变的精密检测，测量精度相对半导体行业标准方法提升约两个数量级^[29]（图 3A、B）。

由于自旋传感器天然对磁信号具有更敏感的反应，因此在测量电场时容易受到磁噪声的影响，消除其干扰是实现实用化电探测的前提。为了解决这一局限性，中国科学技术大学杜江峰组提出了一种能抑制磁信号和噪声同时对电场敏感的方法。基于前期自旋调控技术积累，设计连续动力学解耦序列，形成特定的缀饰态空间，有效地抑制了 NV 色心对磁场的响应，同时保留对电场的线性响应。从而构建了一个更加有效的电信号量子传感器（图 3C、D）。更进一步，研究人员利用这种新的电探测方法，研究了金刚石近表面的电噪声分布^[30]。

除电测量以外，德国斯图加特大学 Wrachrup 组、美国芝加哥大学 Awschalom 组和美国哈佛大学 Lukin 组提出利用钻石 NV 中心对温度的响应实现纳米尺度温度测量，甚至应用于活细胞内部的温度控制^[31-33]。利用自旋传感器的灵敏测磁能力，还可

以开发新型自旋陀螺仪，精度理论极限为 10^{-8} ($^{\circ}$)/h（战略级），可以优于光纤陀螺 5 个数量级；能够研发新一代全张量磁梯度测量系统，通过探测磁异常实现水下目标探测并精确定位。

3 交叉科学研究进展

以上自旋调控及变革性技术为前沿科学问题的研究开启了全新的途径，为学科交叉提供了切入点。目前研究人员正积极探索与各学科领域的交叉融合，并取得了阶段性的重要研究进展。

3.1 基础物理学交叉

(1) 搜寻超越标准模型新粒子的新方法。寻找粒子物理标准模型之外的新粒子对于探索新物理至关重要。因为这些新粒子往往会被用于填补当前粒子物理学、天体物理和宇宙学等多方面的理论缺陷，例如，粒子质量等级问题、强 CP 疑难、正反物质不对称性、以及暗物质和暗能量的物理本质^[34]。1984 年 Moody 和 Wilczek 提出轴子或类轴子可能诱导新奇自旋相互作用，因此提出在实验室搜寻这种宏观尺度相互作用的可能^[35]。2006 年 Dobrescu 和 Mocioiu 将这种新奇自旋相互作用扩展到传播子为

一般玻色子的情形^[36]。国际上已经有精密扭摆实验,原子磁力仪在这种新奇自旋相互作用力程毫米尺度给出严格的实验限定。

2018年中国科学技术大学杜江峰组提出并实现了一种崭新的探测方法,即将金刚石近表面 NV 色心的电子自旋用作传感器来搜寻小于 20 微米范围的电子与核子相互作用,实验装置如图 4 所示。实验表明新传感器可以探索的力程范围是 0.1 微米到 23 微米。在其有效力程范围尚未发现新粒子存在的证据,为电子—核子相互作用的探索提供了新的观测约束,在 20 微米处限定耦合常数小于 6.24×10^{-15} ^[37]。随后又利用单自旋量子传感器,对超越标准模型自旋为 1 的轴矢量玻色子诱导的极化的电子—电子相互作用在微米尺度给出新的实验限定,该结果相比针对这种相互作用的原有国际最好在力程 500 微米处提升 50 倍左右^[38]。在新奇自旋相互作用力程纳米尺度,中国科学技术大学组利用不同长度包含自旋对的刚性链状分子标尺的双电子自旋磁共振实验,给出了新的电子—电子相互作用的实验约束。这一约束在力程 200 纳米处比原有实验约束提升了 1 个量级^[39]。利用单自旋量子传感器研究超出标准模型的新物理是量子精密测量和粒子物理学科交叉的结果,激发了宇宙学、天体物理和高能物理等多个基础科学的广泛兴趣上。

(2) 非厄米量子力学研究。量子力学中支配量子态演化的哈密顿量需要满足厄米性的条件,以保证能量本征值为实数。然而,理论物理学家 Bender 教授于 1998 年提出,一类满足宇称时间对称性的非厄米哈密顿量亦可保证能量本征值为实数,可以描述包括开放系统在内更普遍的对象,从而拓展了量子力学的范畴^[40]。非厄米哈密顿量所描述的物理体系展现的新奇物理性质,例如其本征能谱有奇特的拓扑性质,可以实现更灵敏的探测以及可以在系统和环境之间实现信息的交换等,因此激发了物理

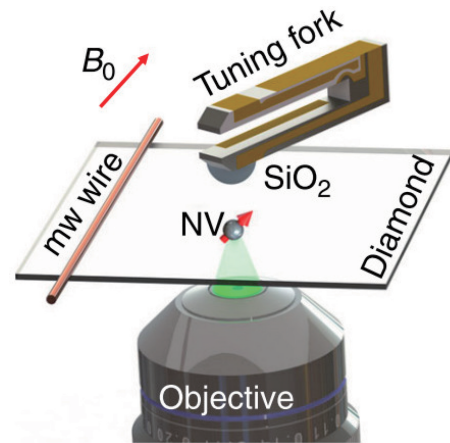


图 4 金刚石 NV 色心搜寻新奇自旋相互作用的实验装置示意图

学界强烈的研究兴趣。但是通常的量子体系由厄米哈密顿量所描述,要在其中实现宇称时间对称哈密顿量的演化,同时保持量子体系的相干性非常具有挑战性。

中国科学技术大学杜江峰组在理论上提出一种在量子系统中实现非厄米哈密顿量并观测到奇异点的普适方法,通过引入一个辅助比特使得目标体系作为一个厄米系统的子系统可以服从非厄米哈密顿量所支配的演化规律^[41]。该方法只需要消耗一个辅助比特就可以实现任意维度的并且含时变化的非厄米哈密顿量。基于此方案,研究组利用具有长相干时间的金刚石样品,将其中的一个氮—空位缺陷中的电子自旋用作系统比特,一个核自旋作为辅助比特,通过施加精准调控的微波射频场,实现了系统比特在非厄米宇称时间对称哈密顿量支配下的动力学演化。通过调节哈密顿量的参数,在保持了体系量子相干性的同时,在单量子体系中观测到宇称时间对称性破缺现象^[41](图 5)。实验结果验证了新方案的可行性,为进一步研究非厄米哈密顿量相关的新奇物理性质提供了坚实的基础。

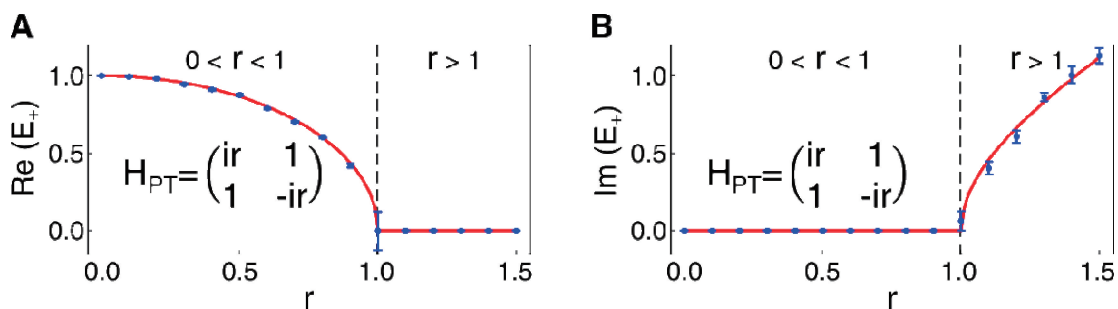


图 5 在单自旋量子体系中实验观测到宇称时间对称性破缺

A 和 B 分别为宇称时间对称哈密顿量 HPT 本征能量 E 的实部和虚部。哈密顿量在其标志性参数 $0 < r < 1$ 的区域,宇称时间对称性未破缺,能量本征值为实数;在 $r > 1$ 的区域,宇称时间对称性破缺,能量本征值为虚数; $r = 1$ 处为相变点。

3.2 生物医学交叉

由于钻石传感器具有很好的生物相容性,因此除了可能为结构生物学带来变革性突破的单分子磁共振谱学,还可以深入细胞甚至活体内,揭示从细胞器到单细胞、再到组织水平的生命活动信息。

美国哈佛大学 Walsworth 组利用 NV 色心阵列实现了宽场磁成像,并将其应用到趋磁细菌磁小体成像^[42]、循环肿瘤细胞筛选等方面^[43],测得了单个神经元的动作电位^[44]。中国科学技术大学杜江峰组将扫描探针与 NV 传感器结合,在铁代谢和铁蛋白功能研究常用的肝癌细胞中进行纳米磁成像实验研究^[27]。该工作中,研究人员首先使用高压冷冻—冷冻替代方法将活细胞瞬间固定并包埋,然后用超薄切片技术将细胞剖开,并将表面修整成纳米级平整度。这时,存在于细胞内部的蛋白质暴露在细胞剖面上,可以与钻石传感器近距离接触。通过对样品进行扫描磁成像,研究人员观测到了细胞内部存在于细胞器中的铁蛋白,分辨率达到 10 纳米。为了拓展成像功能,该组还发展了电镜—磁关联成像技术,同时使用两种不同的技术手段实现了对同一铁蛋白团簇的纳米分辨率观测(图 6)。该工作将细胞磁成像的空间分辨率提高了近两个数量级,为未来广泛开展细胞内蛋白质磁共振成像打下了良好的技术基础,也为实现细胞原位分子尺度的磁共振谱学

研究提供了可能。

除了磁场信息,生命活动中产生的热量和温度变化也可以被 NV 传感器检测到,将可用于线粒体代谢、热遗传学等研究。另外钻石中含有 SiV、GeV 等其它种类色心,光谱拥有比 NV 更小的声子展宽,在全光测温上可能具备更优异的表现。钻石的纳米颗粒作为荧光标记具有无漂白无闪烁的超稳定特点,被用于线虫发育、神经细胞囊泡反常运输等长时间的细胞活动监测^[45]。中国科学技术大学杜江峰组还对纳米自组装结构 DNA 折纸进行优化,成功将 DNA 折纸制备到了金刚石表面,可用于纳米精度的单分子排布,为开展生物大分子的纳米尺度磁共振测量提供了一种新的工具^[46]。

3.3 材料信息学交叉

基于自旋传感器的微观磁成像可以直接揭示磁性材料的结构和动力学特征。法国蒙彼利埃大学 Jacques 组实现了对纳米磁畴壁的巴克豪森跃变、反铁磁结构的成像和监测^[47, 48]。中国科学技术大学杜江峰组实现了对微波场的宽场矢量成像^[26]。2019 年 *Science* 报道了三个研究组(法国巴黎—萨克雷高师 Roch 组、美国耶鲁大学 Yao 组和香港中文大学杨森组)利用 NV 传感器实现高压条件下的微米磁成像^[49-51],未来可能用于高压室温超导相的检测。

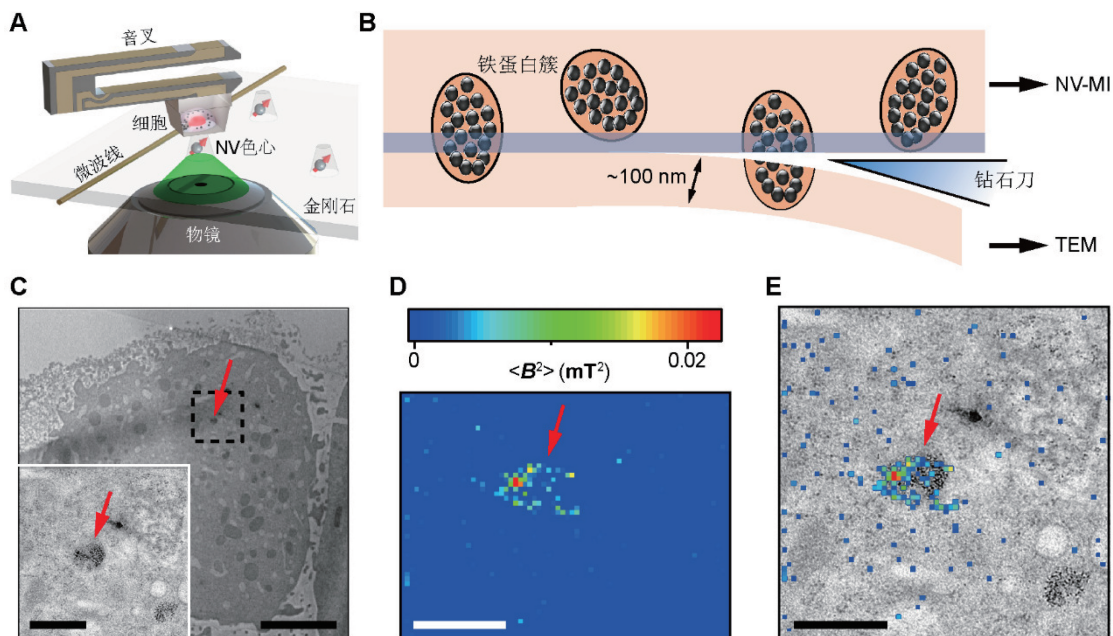


图 6 细胞内铁蛋白的纳米分辨率磁成像。

(A) 扫描磁成像示意图;(B) 细胞样品超薄切片示意图;(C) 透射电镜成像图;(D) 纳米磁成像图;(E) 电镜和磁图像的关联结果。标尺:5 μm (C), 1 μm [C(插图), D 和 E]

低维材料样品通常尺寸小信号弱,磁光克尔显微镜等传统手段难以满足其灵敏度和空间分辨率的要求,微观自旋传感器的出现填补了此方向空白。瑞士巴塞尔大学 Maletinsky 组实现了二维碘化铬晶体铁磁、反铁磁性的扫描成像^[52]。美国哈佛大学 Lukin 组探测到了二维六方氮化硼的核磁共振信号^[53],2019年他们又报道了用 NV 探测石墨烯中的电子—声子切伦科夫效应^[54]。2020年美国哈佛大学 Walsworth、Yacoby 组利用 NV 扫描探针和宽场磁成像结合,对石墨烯中电子—电子相互作用导致的粘性流动实现了成像^[55]。

上述成果掀开了新型微观自旋体系与材料信息等学科前沿交叉广阔前景的一角,未来在高压物理、二维材料、新一代信息存储、先进制程的芯片检测等方向具有难以估量的巨大潜能。

4 自旋交叉科学研究的关键科学问题和发展趋势

灵敏度和空间分辨率是自旋技术应用于交叉科学研究的核心指标。将指标进一步推进的关键问题在于如何保护和充分利用自旋传感器的相干资源、如何高效读出自旋传感器的信号。针对上述两个问题,需要从传感器原材料生长、自旋阵列制备、光学微纳结构加工、微观自旋仪器装备、自旋态高精度调控方法等实施全链条推进。

交叉科学研究通常涉及多个物理量的同时作用,微观自旋精密传感的一个突出特点是对磁、电、力、热、光等多个物理量的响应能力,尤其通过设计自旋调控序列可以选择性地针对其中某一个或某几个物理量实现精密测量。这种多工作模式的灵活切换,在高压物理(磁/电/应变/温度)、半导体先进制程检测(磁/电/温度)、新型拓扑磁结构及多铁材料(磁/电)、磁致伸缩材料(磁/应变)、热遗传学(温度/光/磁)等涉及多个物理量相互作用的前沿交叉领域具有巨大的想象空间。

目前自旋交叉科学的研究多集中于利用钻石 NV 色心和磷硅等体系,然而随着交叉的深入拓展,研究需求也日益多样化。钻石、碳化硅、六方氮化硼、硅等固体中含有种类极为丰富的点缺陷资源,搜寻其它类型的新颖微观自旋体系,可以提供开辟新赛道从而实现跨越式领先的难得机遇。

5 总结与建议

自旋的巨大潜力还远未充分挖掘。在微观尺度

对自旋的主动调控和观测是开启其潜力的钥匙,将在多学科领域的交叉科学研究中获得突破,并最终诞生对人类产生深远影响的科学技术。

自旋交叉科学研究领域的国际竞争日益激烈。除前述世界主要国家的国家层面支持外,从学术机构参与度看,该领域从十年前仅有数个研究团队到现在已有逾五十个研究组加入,其中有做技术指标,也有做交叉领域应用推广的研究团队,开展了全方位的竞争。

我国在这一领域具有先发优势,有较好的研究积累,并在数个方向上处于世界领先水平。但我国要真正站上这一新兴科技领域的制高点,必须全盘布局,开展全链条研究,即从自旋传感器制备到科学仪器研制、从变革性技术研发到交叉科学研究、从前沿科学探索到产业化推广应用,一环扣一环,不能有所偏废。需清醒认识到,自旋传感器制备涉及的材料制备和加工工艺是我国的弱项,我国在科技成果转化速度上也落后于有经验的欧美发达国家。材料工艺的短板会导致我国在这一领域的研究根基不稳固,易受制于人;成果转化速度慢有可能造成“起个大早赶个晚集”的尴尬局面,在新兴产业的竞争中落于下风。为积极应对上述竞争形势和适应自旋交叉科学研究中极强的科学、技术、工程交叉融合的特点,建议国家应开展顶层设计,如设立国家重点科研机构,从体制机制和支持力度上给予充分的保障,凝聚和维持一支具有广泛领域背景的国家战略研究力量,主动促使学科交叉融合、形成攻关合力,解决短板,从而巩固和扩大我国在这一新兴领域的领先优势。

参 考 文 献

- [1] Gruber A, Drabenstedt A, Tietz C, et al. Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centers. *Science*, 1997, 276(5321): 2012—2014.
- [2] Delteil A, Gao WB, Fallahi P, et al. Observation of quantum jumps of a single quantum dot spin using submicrosecond single-shot optical readout. *Physical Review Letters*, 2014, 112(11): 116802.
- [3] Bassett LC, Heremans FJ, Christle DJ, et al. Ultrafast optical control of orbital and spin dynamics in a solid-state defect. *Science*, 2014, 345(6202): 1333—1337.
- [4] Du JF, Rong X, Zhao N, et al. Preserving electron spin coherence in solids by optimal dynamical decoupling. *Nature*, 2009, 461(7268): 1265—1268.
- [5] Rong X, Geng JP, Shi FZ, et al. Experimental fault-tolerant universal quantum gates with solid-state spins under ambient conditions. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 8748.

- [6] Glover P, Mansfield SP. Limits to magnetic resonance microscopy. *Reports on Progress in Physics*, 2002, 65(10): 1489—1511.
- [7] Maze JR, Stanwix PL, Hodges JS, et al. Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond. *Nature*, 2008, 455(7213): 644—647.
- [8] Balasubramanian G, Chan IY, Kolesov R, et al. Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions. *Nature*, 2008, 455(7213): 648—651.
- [9] Staudacher T, Shi F, Pezzagna S, et al. Nuclear magnetic resonance spectroscopy on a (5-nanometer) 3 sample volume. *Science*, 2013, 339(6119): 561—563.
- [10] Mamin HJ, Kim M, Sherwood MH, et al. Nanoscale nuclear magnetic resonance with a nitrogen-vacancy spin sensor. *Science*, 2013, 339(6119): 557—560.
- [11] Müller C, Kong X, Cai JM, et al. Nuclear magnetic resonance spectroscopy with single spin sensitivity. *Nature Communications*, 2014, 5: 4703.
- [12] Shi F, Zhang Q, Wang P, et al. Single-protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions. *Science*, 2015, 347(6226): 1135—1138.
- [13] Shi F, Kong F, Zhao P, et al. Single-DNA electron spin resonance spectroscopy in aqueous solutions. *Nature Methods*, 2018, 15(9): 697—699.
- [14] Lovchinsky I, Sushkov AO, Urbach E, et al. Nuclear magnetic resonance detection and spectroscopy of single proteins using quantum logic. *Science*, 2016, 351(6275): 836—841.
- [15] Boss JM, Cujia KS, Zopes J, et al. Quantum sensing with arbitrary frequency resolution. *Science*, 2017, 356(6340): 837—840.
- [16] Schmitt S, Gefen T, Stürner FM, et al. Submillihertz magnetic spectroscopy performed with a nanoscale quantum sensor. *Science*, 2017, 356(6340): 832—837.
- [17] Aslam N, Pfender M, Neumann P, et al. Nanoscale nuclear magnetic resonance with chemical resolution. *Science*, 2017, 357(6346): 67—71.
- [18] Glenn DR, Bucher DB, Lee J, et al. High-resolution magnetic resonance spectroscopy using a solid-state spin sensor. *Nature*, 2018, 555(7696): 351—354.
- [19] Kong F, Zhao PJ, Ye XY, et al. Nanoscale zero-field electron spin resonance spectroscopy. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1563.
- [20] Kong F, Zhao PJ, Yu P, et al. Kilohertz electron paramagnetic resonance spectroscopy of single nitrogen centers at zero magnetic field. *Science Advances*, 2020, 6(22): eaaz8244.
- [21] Abobeih MH, Randall J, Bradley CE, et al. Atomic-scale imaging of a 27-nuclear-spin cluster using a quantum sensor. *Nature*, 2019, 576(7787): 411—415.
- [22] Rugar D, Mamin HJ, Sherwood MH, et al. Proton magnetic resonance imaging using a nitrogen-vacancy spin sensor. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(2): 120—124.
- [23] Devience SJ, Pham LM, Lovchinsky I, et al. Nanoscale NMR spectroscopy and imaging of multiple nuclear species. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(2): 129—134.
- [24] Häberle T, Schmid-Lorch D, Reinhard F, et al. Nanoscale nuclear magnetic imaging with chemical contrast. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(2): 125—128.
- [25] Grinolds MS, Warner M, De Greve K, et al. Subnanometre resolution in three-dimensional magnetic resonance imaging of individual dark spins. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(4): 279—284.
- [26] Wang PF, Yuan ZH, Huang P, et al. High-resolution vector microwave magnetometry based on solid-state spins in diamond. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6631.
- [27] Wang PF, Chen SY, Guo MS, et al. Nanoscale magnetic imaging of ferritins in a single cell. *Science Advances*, 2019, 5(4): eaau8038.
- [28] 丁哲, 石发展, 杜江峰. 基于金刚石量子传感的纳米磁成像及凝聚态物理应用. *物理*, 2020, 49(6): 359—372.
- [29] Zhang Q, Hu G, de Boo GG, et al. Single rare-earth ions as atomic-scale probes in ultrascaled transistors. *Nano Letters*, 2019, 19(8): 5025—5030.
- [30] Li R, Kong F, Zhao PJ, et al. Nanoscale electrometry based on a magnetic-field-resistant spin sensor. *Physical Review Letters*, 2020, 124(24): 247701.
- [31] Neumann P, Jakobi I, Dolde F, et al. High-precision nanoscale temperature sensing using single defects in diamond. *Nano Letters*, 2013, 13(6): 2738—2742.
- [32] Toyli DM, de las Casas CF, Christle DJ, et al. Fluorescence thermometry enhanced by the quantum coherence of single spins in diamond. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(21): 8417—8421.
- [33] Kucsko G, Maurer PC, Yao NY, et al. Nanometre-scale thermometry in a living cell. *Nature*, 2013, 500(7460): 54—58.
- [34] Safronova MS, Budker D, Demille D, et al. Search for new physics with atoms and molecules. *Reviews of Modern Physics*, 2018, 90(2): 025008.
- [35] Moody JE, Wilczek F. New macroscopic forces?. *Physical Review D*, 1984, 30(1): 130—138.
- [36] Dobrescu BA, Mocioiu I. Spin-dependent macroscopic forces from new particle exchange. *Journal of High Energy Physics*, 2006, 2006(11): 5.
- [37] Rong X, Wang M, Geng J, et al. Searching for an exotic spin-dependent interaction with a single electron-spin quantum sensor. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 739.
- [38] Rong X, Jiao M, Geng JP, et al. Constraints on a spin-dependent exotic interaction between electrons with single electron spin quantum sensors. *Physical Review Letters*, 2018, 121(8): 080402.
- [39] Jiao M, Rong X, Liang H, et al. Searching for an exotic spin-dependent interaction between electrons at the nanometer scale with molecular rulers. *Physical Review D*, 2020, 101(11): 115011.
- [40] Bender CM, Boettcher S. Real spectra in non-hermitian hamiltonians having PT symmetry. *Physical Review Letters*, 1998, 80(24): 5243—5246.
- [41] Wu Y, Liu WQ, Geng JP, et al. Observation of parity-time symmetry breaking in a single-spin system. *Science*, 2019, 364(6443): 878—880.
- [42] Le Sage D, Arai K, Glenn DR, et al. Optical magnetic imaging of living cells. *Nature*, 2013, 496(7446): 486—489.

- [43] Glenn DR, Lee K, Park H, et al. Single-cell magnetic imaging using a quantum diamond microscope. *Nature Methods*, 2015, 12(8): 736—738.
- [44] Barry JF, Turner MJ, Schloss JM, et al. Optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(49): 14133—14138.
- [45] Haziza S, Mohan N, Loe-Mie Y, et al. Fluorescent nanodiamond tracking reveals intraneuronal transport abnormalities induced by brain-disease-related genetic risk factors. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(4): 322—328.
- [46] 魏一成, 余佩, 陈明, 等. 用于金刚石表面单分子有序固定的DNA折纸制备. *生物化学与生物物理进展*, 2020, 47(1): 53—60.
- [47] Tettienne JP, Hingant T, Kim JV, et al. Nanoscale imaging and control of domain-wall hopping with a nitrogen-vacancy center microscope. *Science*, 2014, 344(6190): 1366—1369.
- [48] Gross I, Akhtar W, Garcia V, et al. Real-space imaging of non-collinear antiferromagnetic order with a single-spin magnetometer. *Nature*, 2017, 549(7671): 252—256.
- [49] Hsieh S, Bhattacharyya P, Zu C, et al. Imaging stress and magnetism at high pressures using a nanoscale quantum sensor. *Science*, 2019, 366(6471): 1349—1354.
- [50] Yip KY, Ho KO, Yu KY, et al. American measuring magnetic field texture in correlated electron systems under extreme conditions. *Science*, 2019, 366 (6471): 1355—1359.
- [51] Lesik M, Plisson T, Toraille L, et al. Magnetic measurements on micrometer-sized samples under high pressure using designed NV centers. *Science*, 2019, 366 (6471): 1359—1362.
- [52] Thiel L, Wang Z, Tschudin MA, et al. Probing magnetism in 2D materials at the nanoscale with single-spin microscopy. *Science*, 2019, 364(6444): 973—976.
- [53] Lovchinsky I, Sanchez-Yamagishi JD, Urbach EK, et al. Magnetic resonance spectroscopy of an atomically thin material using a single-spin qubit. *Science*, 2017, 355 (6324): 503—507.
- [54] Andersen TI, Dwyer BL, Sanchez-Yamagishi JD, et al. Electron-phonon instability in graphene revealed by global and local noise probes. *Science*, 2019, 364 (6436): 154—157.
- [55] Ku MJH, Zhou TX, Li Q, et al. Imaging viscous flow of the Dirac fluid in graphene. *Nature*, 2020, 583 (7817): 537—541.

Spin-based Interdisciplinary Research

Du Jiangfeng* Zhang Qi Ju Chenyong Rong Xing Shi Fazhan Chen Sanyou
CAS Key Laboratory of Microscale Magnetic Resonance, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract Spin is an intrinsic property of the particles in nature. Many important applications in modern sciences are based on the effects of spin, such as magnetic resonance imaging and magnetic memory. Over the past thirty years, with the great progresses of experimental technologies, one can now precisely control and measure a few or even a single spin in the microscale, which opens up brand new applications of spin. Those spin-based disruptive technologies being studied may bring breakthroughs in basic sciences through interdisciplinary researches, and further lead to several important realistic applications which will potentially change the human society. Spin-based interdisciplinary research has attracted broad interests and led to intense competitions between the main countries in the world. Here we briefly review the main progresses in this field as well as its key scientific problems and future development tendency. Recommendations on how to keep competitive of our country in this emerging scientific field are provided finally.

Keywords spin; interdisciplinary science; quantum control; microscale magnetic resonance; spin sensor

(责任编辑 刘敏)

* Corresponding Author, Email: qcmr@ustc.edu.cn