

特邀综述

扫描隧道显微镜中的量子相位研究

闫超^{1)†} 高沐伟¹⁾ 赵悦¹⁾ 殷嘉鑫^{1)2)‡}

1) (南方科技大学物理系, 量子功能材料全国重点实验室, 广东省高等学校量子科学基础研究卓越中心, 深圳 518055)

2) (粤港澳大湾区量子科学中心, 深圳 518045)

(2025 年 12 月 31 日收到; 2026 年 2 月 3 日收到修改稿)

量子相位是刻画波函数性质与量子物态本质的重要物理量, 蕴含着体系的几何、拓扑及多体关联等关键信息. 长期以来, 相位往往只能通过动量空间表征或宏观输运测量间接获取, 难以在实空间中直接观测. 近年来, 扫描隧道显微镜 (STM) 及其谱学 (STS) 技术凭借原子级空间分辨率和对局域电子态的高度敏感性, 为量子相位的实空间探测提供了新的实验途径. 本文系统综述了基于 STM 的量子相位研究进展, 重点介绍了 4 类代表性方法: 通过局域干涉探测阿哈罗诺夫-玻姆效应的几何相位; 借助缺陷诱导背散射与波前位错解析材料的拓扑相位; 利用序参量分解重构魔角石墨烯等对称体系中的复相位结构; 以及结合二维锁相技术研究非常规超导体中配对密度波与电荷密度波的相位纹理及拓扑缺陷. 这些研究表明, STM 能够将抽象的量子相位转化为可视化、可量化的实空间物理量, 为理解拓扑物态、对称性破缺和电子关联提供了新的实验视角, 也为未来相位工程和量子器件研究奠定基础.

关键词: 扫描隧道显微镜, 贝里相位, 电荷密度波, 配对密度波**DOI:** 10.7498/aps.75.20251800**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251800

1 引言

相位作为波动现象 (光波、声波、物质波等) 的基本属性之一, 在传统研究中常被视为振幅的“附属品”. 传统研究多集中于振幅的强度调控, 而相位因其难以直接观测和捕捉, 其深层次的物理内涵和巨大应用潜力未被充分发掘. 然而, 随着精密测量、信息技术和量子科技等领域的飞速发展, 研究人员逐渐认识到: 相位不仅是描述波动状态的核心参数, 更是承载信息、调控能量、揭示物理机制的关键维度. 相位蕴含着系统的拓扑、对称性和关联效应等关键信息. 对相位的深入研究与精准操控, 已成为突破现有技术瓶颈、催生原始创新的重要途径.

1981 年, IBM 苏黎世实验室的 Binnig 与 Rohrer, 基于针尖与样品之间的量子隧道效应, 成功研制出扫描隧道显微镜 (scanning tunneling micro-

scopy, STM)^[1-3]. STM 可同时获得样品表面的原子级形貌与局域态密度信息. 其具有的原子级空间分辨率和对局域态密度的敏感性, 使其能够探测由量子干涉产生的实空间电子波函数模式, 从而为将抽象的量子相位转化为可直接观测的实空间物理量提供了实验途径.

基于 STM 的量子相位探测, 根据其物理原理与核心方法, 主要可归纳为以下 4 类: 1) 通过构建实空间干涉仪, 探测阿哈罗诺夫-玻姆 (Aharonov-Bohm, AB) 效应中的几何相位; 2) 利用材料缺陷诱导背散射, 借助波前位错分析判断量子几何相位; 3) 针对对称性较高的体系, 发展基于对称性序参量分解方法, 重构出序参量的相位结构; 4) 借助二维锁相技术研究量子相位, 精确解析非常规超导体中配对密度波 (pair density wave, PDW) 等序参量的相位纹理与拓扑缺陷. 下文将系统回顾这些方法的发展与应用, 展示 STM 如何逐步将量子相

† 通信作者. E-mail: yanc@sustech.edu.cn‡ 通信作者. E-mail: yinjx@sustech.edu.cn

位从一个抽象的数学概念, 转化为可在实空间中可视化、测量乃至操控的核心物理量, 并展望其在推动拓扑物态理解与量子相位工程方面的潜力.

2 探测阿哈罗诺夫-玻姆效应

1959年, Aharonov 和 Bohm^[4] 提出了电子在磁场中运动的干涉假想实验, 即 AB 效应. 该理论指出, 即使电子在磁场为零的区域运动, 其波函数相位仍会受到磁矢势的影响而发生改变, 从而在实验上表现为可观测的干涉图样变化. 在过去数十年中, 对 AB 效应的验证主要依赖测量环形导体中随磁通周期振荡的电导信号^[5-15]. 然而, 这类基于宏观电运输的测量手段普遍缺乏空间分辨能力, 难以在微观尺度上直观呈现干涉行为的细节. 因此, 探索并实现具有空间分辨能力的 AB 效应测量方法,

逐渐成为该领域一个值得关注的研究方向.

2009年, Cano 和 Paul^[16] 的理论研究指出, 在诸如 Cu(111), Ag(111) 等具有二维电子气的金属表面, 吸附原子或结构缺陷可作为电子的散射中心. 当电子在多个散射体之间发生多重散射并形成闭合回路时 (图 1(a)), 在无外磁场条件下, 电子波函数沿顺时针与逆时针两条时间反演对称路径传播并发生干涉, 从而调制体系的局域态密度. 若施加垂直于样品表面的磁场, 电子在两条路径中因磁矢势 \mathbf{A} 的作用将累积不同的 AB 相位, 其相位差为 $2\pi\Phi/\Phi_0$ (Φ 表示回路中的磁通, Φ_0 表示磁通量子), 导致原本相长干涉的局域态密度变为随 $\cos(2\pi\Phi/\Phi_0)$ 变化的振荡形式, 图 1(b) 中水平条纹即为磁场引起的干涉调制结果. 因此, 无论固定针尖位置改变磁场, 还是固定磁场改变针尖位置, 都能在 STM 测量的微分电导 dI/dV 中观测到与 AB

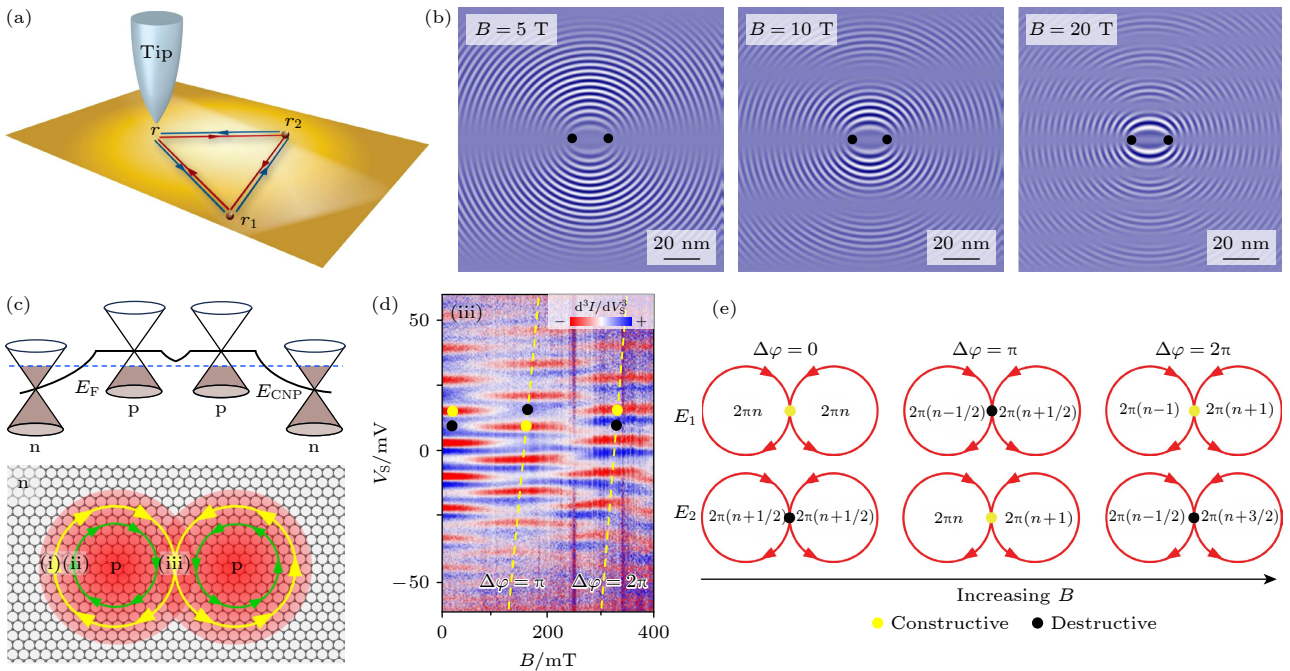


图 1 利用 STM 研究 AB 效应 (a) STM 干涉仪示意图, 通过测量局域态密度, 反映由两个杂质 (r_1 和 r_2) 对电子波散射所产生的量子干涉, 在施加外磁场后, AB 效应将调制该干涉过程, 导致局域态密度发生周期性振荡^[16]; (b) Ag(111) 表面两个杂质在不同磁场下所引发干涉现象的理论模拟图, 其中的水平条纹即为 AB 效应所导致^[16]; (c) 耦合双量子点结构示意图, 图中标出了圆形与“8”字形两类电子轨道^[20]; (d) 在图 (c) (iii) 位置处测得的三阶微分电导 d^3I/dV_S^3 随磁场的演化^[20]; (e) 在 AB 效应下, 在外磁场下, “8”字形轨道中心不同能级处的量子干涉情况, 其中黄色与黑色圆点分别表示相长干涉与相消干涉^[20]

Fig. 1. Probing the AB effect using STM: (a) Schematic illustration of an STM interferometer, in which quantum interference arises from electron-wave scattering by two impurities located at r_1 and r_2 , as reflected in the measured LDOS. Upon applying an external magnetic field, the AB effect modulates the interference process, resulting in periodic oscillations of the LDOS^[16]. (b) Theoretical simulations of the interference patterns induced by two impurities on the Ag(111) surface under different magnetic fields, where the horizontal fringes originate from the AB effect^[16]. (c) Schematic of a coupled double quantum dots structure, highlighting two types of electron trajectories: circular and “8” orbits^[20]. (d) Magnetic-field evolution of the third-order differential conductance d^3I/dV_S^3 , measured at position (iii) in panel (c)^[20]. (e) Quantum interference patterns at different energy levels at the center of the “8” orbit under an external magnetic field, where yellow and black dots denote constructive and destructive interference, respectively^[20].

效应相关的周期性振荡. 该理论工作表明, STM 有望实现纳米尺度的 AB 干涉仪, 为后续实验研究提供了重要的理论依据与探索方向. 此后, 系列理论工作进一步预测, 在应变石墨烯表面^[17]、拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 表面^[18,19] 以及利用自旋极化 STM^[18,19] 等技术, 同样可以实现类似的 AB 效应.

2023 年, Jairo Velasco Jr. 团队^[20] 利用 STM 结合电脉冲技术, 在石墨烯/六方氮化硼异质结表面构筑了两个间距约 150 nm 的圆形 p 型掺杂区域. 由于电荷聚集, 每个区域形成了具有量子受限效应的静电势阱, 类似于人工原子^[21-24]. 通过将两个量子点相互耦合 (图 1(c)), 实现了具有相对论性电子行为的“人工分子”结构^[20,25-27]. 研究人员测量不同区域的 STS, 探测到迥异的电子束缚能级和轨道特征. 在对应于“8”字形轨道中心的区域 (iii), 通过施加磁场并进行谱学测量, 研究人员发现三阶微分电导 d^3I/dV_s^3 随外磁场发生演化, 呈现出交错条纹状的演化图谱 (图 1(d)). 在该受限体系中, 电子波函数形成闭合的“8”字形轨道结构, 电子沿两个相反方向运动. 当电子回到轨道中心区域 (iii) 时, 由于所经路径包围了磁通, 电子波函数累积了一定的 AB 相位:

$$\Delta\phi = \frac{e}{h} \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \frac{e}{h} \Phi_B,$$

其中, \mathbf{A} 是磁矢势, l 为路径, Φ_B 是穿过圆环的磁通量.

随着外磁场的增大, AB 相位呈线性变化, 导致局域态密度在相长干涉与相消干涉之间周期振荡 (图 1(d)), 从而在实验图谱中呈现出规律的交错条纹. 该现象可视为 AB 相位受磁场周期调制的直接证据.

该研究首次利用 STM 在石墨烯双耦合量子点体系中直接观测到了 AB 振荡的空间分辨信号, 为探究 AB 效应这一量子几何相位提供研究平台. 此外, 有研究人员创新性地利用小转角双层石墨烯结构重构及其独特的电学性质, 成功在该体系中探测到 AB 振荡的信号^[28]. 不仅拓展了 AB 效应在低维量子体系中的实验表征手段, 也为在复杂器件结构中探索拓扑与几何相位效应开辟了新途径.

3 借助波前位错探测贝里相位

除通过外磁场主动引入的 AB 相位外, 材料自

身的拓扑缺陷也能作为探针, 用于探究体系的贝里相位. 这催生了在零磁场下, 通过分析缺陷散射诱导波前位错来研究量子相位. 贝里相位是波函数沿绝热路径积累的、具有规范不变性的几何相位. 前一部分 AB 效应所积累的相位可视为其具体表现形式之一. 在单层石墨烯中, 无质量的相对论性狄拉克费米子沿闭合轨道运动将积累 π 的贝里相位^[29-31], 这一现象已通过反常量子霍尔效应实验得到验证. 传统意义上, 贝里相位的测量通常需要借助外电磁场, 使带电粒子沿闭合轨道围绕相位奇点 (狄拉克点) 进行运动^[29,30,32-38]. 那么, 是否可以在零磁场下实现对石墨烯中贝里相位的测量?

受生长与制备工艺的影响, 实际制备的石墨烯往往存在多种原子缺陷. 缺陷打破了石墨烯 A , B 子格间的对称性, 从而引发体系中准粒子发生散射. 当散射发生在同一个能谷内 (K 谷或 K' 谷), 即谷内散射^[39-41], 由于波矢 \mathbf{q} 和 $-\mathbf{q}$ 对应的赝自旋 (赝自旋, 描述电子在晶格中两个不等价碳原子上的内禀自由度) 相差 π , 两束电子波会相互抵消, 因此谷内散射会被抑制. 除谷内散射外, 缺陷亦可引起不同手性的能谷之间的电子散射, 即谷间散射^[39-41] (图 2(a)). 该过程中两个谷的电子波矢 \mathbf{q} 和 $-\mathbf{q}$ 通过极化角 θ_q 相联系起来, 在实空间中表现为形成 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R 30^\circ$ 的电荷密度波 (charge density wave, CDW) 调制^[39]. 谷间散射过程涉及波矢在两个谷间进行散射, 导致能谷中赝自旋发生旋转. 赝自旋的旋转直接反映了石墨烯的能谷拓扑特性, 因此可通过缺陷势诱导的赝自旋演化来研究其中的几何相位物理.

波前位错是一种基本且普遍存在的波现象, 源于波场相位的不确定性, 导致波振幅消失. 1974 年, Nye 和 Berry^[42] 的研究表明, 当涡旋波和平面波进行干涉时, 实空间增加的波前条数量与涡旋波的角动量在数值上是相等的. 基于这一思想, 可以利用缺陷势诱导电子散射产生的波前条纹数变化, 来研究零磁场下石墨烯中的贝里相位等物理问题.

在过去几年, 研究人员利用 STM 成功观测到石墨烯中赝自旋涡旋与平面波干涉所引发的现象. 通过对缺陷所在区域进行扫描, 获得缺陷势诱导的 CDW 振荡信息; 进一步借助快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 提取特定谷间散射方向上的电荷密度振荡, 从而确定波前条纹数目, 揭示石墨烯中赝自旋涡旋的结构. 新增波前条纹的数目直接反映赝自旋涡旋所携带的角动量信息,

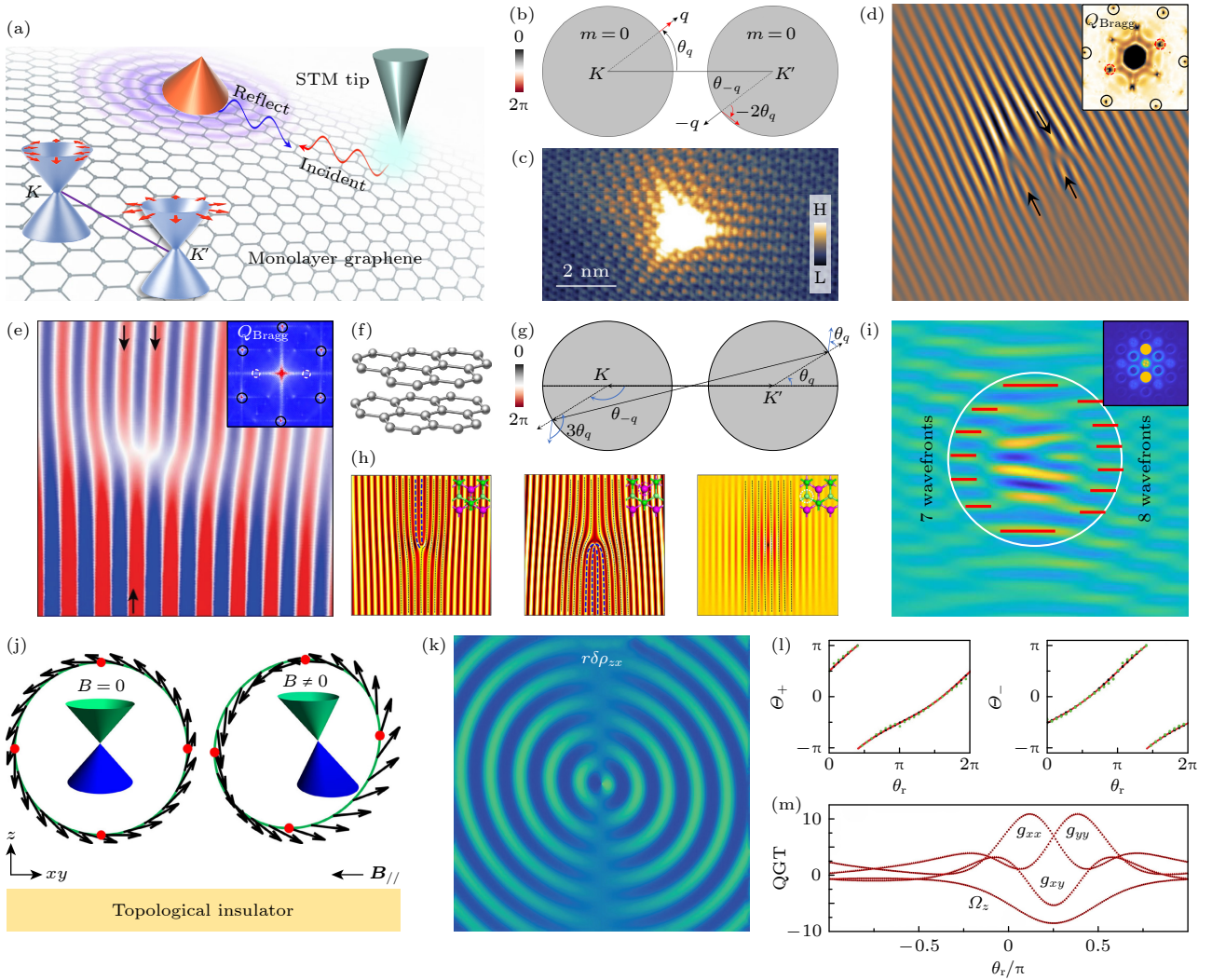


图 2 利用背散射与波前位错研究相位 (a) STM 探针与缺陷间的量子干涉示意图; (b) 单层石墨烯背散射过程, 波矢不携带轨道角动量, 其中 K 谷和 K' 谷之间的波散射导致赝自旋旋转 $2\theta_q$ ^[43]; (c) 氢原子吸附的单层石墨烯 STM 形貌图^[43]; (d) 插图 为图 (c) 的 FFT 图像; 沿插图红色虚线标示的谷间散射方向进行逆变换, 得到实空间电荷密度振荡图, 图中可见新增 两波前条纹^[43]; (e) 插图 为快速傅里叶变换图像; 沿插图中白色虚线圆圈标示的谷间散射方向进行逆变换, 得到的实空间电荷密度 振荡图, 图中可见新增一波前条纹^[44]; (f) 伯纳尔堆垛双层石墨烯示意图; (g) 伯纳尔堆垛双层石墨烯谷间散射过程; (h) 在 双层石墨烯中, 位于不同晶格位点的单原子缺陷引发的谷间散射某一方向在实空间中产生的电荷密度振荡图, 分别产生 4 条、2 条、 0 条额外的波前条纹^[55]; (i) 计算的双层转角石墨烯的波前^[75]; (j) 三维拓扑绝缘体表面态在有 无水平磁场下的能谷特性^[77]; (k) 利用自旋极化 STM 测得的态密度实空间振荡分布^[77]; (l) 计算得到的自旋旋量^[77]; (m) 计算得到的量子度规和贝里曲率^[80]

Fig. 2. Probing quantum phase via backscattering and wavefront dislocation: (a) Schematic of quantum interference between an STM tip and a defect; (b) backscattering processes in monolayer graphene, where the wave vector carries no orbital angular momentum; intervalley scattering between the K and K' valleys induces a pseudospin rotation of $2\theta_q$ ^[43]; (c) STM topographic image of monolayer graphene with hydrogen adatom^[43]; (d) inset shows FFT of panel (c); an inverse transform performed along the intervalley-scattering direction indicated by the red dashed circles yields the real-space charge-density oscillations, revealing two additional wavefront dislocations^[43]; (e) inset shows FFT image; an inverse transform along the intervalley-scattering directions marked by the white dashed circles produces real-space charge-density oscillations with one additional wavefront dislocations^[44]; (f) schematic of Bernal-stacked bilayer graphene; (g) intervalley scattering processes in Bernal-stacked bilayer graphene; (h) real-space charge-density oscillations along a specific intervalley-scattering direction in bilayer graphene induced by single-atom defects located at different lattice sites, producing 4, 2, and 0 additional wavefront dislocations, respectively^[55]; (i) calculated wavefronts in twisted bilayer graphene^[75]; (j) valley characteristics of surface states in a three-dimensional topological insulator with and without an in-plane magnetic field^[77]; (k) real-space oscillation patterns of the DOS measured by spin-polarized STM^[77]; (l) calculated spin textures^[77]; (m) calculated quantum metric and Berry curvature^[80].

进而可用于测量贝里相位等. 在单层石墨烯中, 如果单原子缺陷引入的是局域旋转对称势场, 则准粒

子在两个手性相反的谷 (K 谷与 K' 谷) 之间发生弹性散射 (图 2(b)), 此时赝自旋会发生 $2\theta_q$ 的旋

转, 等效产生一个角动量为 2 的赝自旋涡旋. 2019 年, Renard 团队^[43] 利用 STM 观测到石墨烯表面氢原子吸附所诱导的谷间散射行为 (图 2(c)), 并通过傅里叶变换提取特定谷间散射方向上的电荷密度振荡信号, 发现任一散射方向均出现两条额外的波前条纹 (图 2(d)). 该实验结果直接反映了子格赝自旋的涡旋数, 证实单层石墨烯的贝里相位为 π .

在单层石墨烯中, 当单原子缺陷引入的是局域旋转非对称性势场, 散射的电子波会形成具有特定轨道角动量的螺旋波, 并携带相位奇点, 从而诱导产生新的波前位错. 除了两个能谷间电子进行散射及其对应赝自旋进行旋转外, 不同轨道角动量受限态耦合, 二者共同影响相位变化. 2024 年, 何林团队和孙庆丰团队^[44] 在单层石墨烯的单原子缺陷周围施加局域旋转非对称势场, 研究轨道角动量对相位奇点的影响. 实验发现, 旋转非对称势场可以改变缺陷周围的波前结构, 使原本两条波前位错转变为单条位错 (图 2(e)). 该现象源于不同轨道角动量受限态之间的耦合以及赝自旋的旋转, 二者共同作用引起几何相位变化, 从而导致这一反常行为. 该研究进一步深化了对轨道角动量调控相位奇点物理机制的理解.

除此以外, 部分实验工作还研究了单层石墨烯手性不同的赝自旋涡旋之间的相干与耦合^[45,46], 部分理论工作预测了开能隙^[47]、磁性掺杂^[48]及三角扭曲能带^[49]石墨烯仍产生 2 个波前位错, 有待实验进一步验证.

伯纳尔堆垛的双层石墨烯 (图 2(f)) 与单层石墨烯的能带结构^[31,50-54]和赝自旋取向不同, 因此缺陷周围的局域态密度将会存在差异. 2020 年, 何林团队等^[55] 利用 STM 对伯纳尔石墨烯的拓扑性质进行研究发现, 单原子缺陷引起的谷间散射 (图 2(g)) 在实空间形成特定的 CDW 振荡. 与单层石墨烯类似, 新增的波前条纹数目, 直接对应子格赝自旋涡旋的绕数. 与单层石墨烯不同, 伯纳尔石墨烯中缺陷导致子格对称性破缺, 从而影响谷间散射波函数在层间的分布, 使得贝里相位积累的绕数在上层和下层石墨烯之间重新分配. 在 STM 探测中, 该干涉图案可呈现相消或叠加状态, 因而波前位错 N 随缺陷位置的不同而呈现 $N = 4, 2, 0$ 的差异 (图 2(h)), 从而影响观测结果. 该团队进一步将这一思想推广至多层石墨烯体系, 并研究了不同绕数下赝自旋涡旋之间的量子干涉. 该方法为多层石

墨烯中贝里相位测定提供了可靠的实验方案, 也为在更多拓扑材料体系中探索零场下的相位物理开辟了新的可能性.

魔角石墨烯的平带在不同填充下呈现的关联物态是近年研究前沿^[56-74]. 理解其电子关联需要构建准确的低能有效模型, 但模型的拓扑性质高度依赖于体系的对称性. 由于缺少实验判据, 难以确定何种模型更符合实际. 受波前位错研究启发, 2020 年, Phong 和 Mele^[75] 提出在莫尔条纹不同堆垛区域引入缺陷, 利用缺陷势引起的电子散射在局域态密度中引起的特征 (图 2(i) 所示) 来区分上述模型. 这为通过实空间杂质散射响应甄别合适的低能模型提供了新途径.

上述方法适用于石墨烯等自旋-轨道耦合较弱的多谷系统, 而对于自旋-轨道耦合较强的单谷系统 (如三维拓扑绝缘体表面态) 将不再适用. 量子几何张量作为描述本征态几何性质的核心量, 其对称部分 (量子度规) 和反对称部分 (贝里曲率) 共同刻画了系统的拓扑与几何响应^[76]. 然而, 实验中对量子几何张量的提取一直颇具挑战. 为了解决这一问题, 2024 年, 常凯团队^[77] 提出一种基于自旋极化 STM 测量量子几何张量的方案. 通过施加水平磁场, 使能谷发生倾斜^[78,79] (图 2(j)), 借助自旋极化 STM 测量磁性杂质周围的弗里德尔振荡 (图 2(k)), 从振荡的几何振幅提取动量分辨的自旋纹理 (图 2(l)). 由于自旋纹理直接与本征态的旋量相位相关, 通过对自旋矢量进行动量微分^[80], 有望重构出完整的量子几何张量 (图 2(m)). 该方法不仅适用于拓扑绝缘体表面态等具有强自旋-轨道耦合的体系, 还可推广至存在面内磁场或存在能隙的体系, 为在实空间中直接测量量子几何张量提供了可行的技术路径.

此外, Engström 等^[81] 提出理论方案, 利用杂质散射诱导的准粒子干涉, 通过自旋极化 STM 测量局域态密度, 有望探测二维节点超导体节点的拓扑缠绕数.

石墨烯等独特的能谷结构以及材料的拓扑奇点为研究量子几何相位提供了重要基础, 这些研究成果为深入理解其他体系提供了研究思路与方法. 例如, 过渡金属硫族化合物^[82]、部分笼目晶格^[83,84]材料中, 类似的赝自旋或自旋纹理可能同样承载着丰富的相位物理, 可通过类似的散射干涉手段进行探测. 这些研究推动了对凝聚态物理低维系统中相

位奇点、波前位错以及拓扑缺陷等关键物理现象的深入理解,也为未来量子调控与拓扑电子学器件的设计奠定了理论与实验基础。

4 借助序参量分解研究相位信息

近年来,魔角双层石墨烯因其平带中涌现的关联绝缘态^[56,71,85]、非常规超导态^[57,59,68]及拓扑磁性态^[60,73]等新奇量子物态,成为凝聚态物理的研究前沿。在填充因子 $\nu = \pm 2$ 时,体系呈现出典型的关联绝缘态。理论已提出多种能量简并的候选基态^[86-89],但实验上缺乏有效手段予以明确区分。STM/STS 技术具有原子级空间分辨与电子态敏感的优势,能够表征不同基态对应的局域态密度特征。研究者提出一系列区分不同魔角石墨烯基态的局域态密度特征^[85,90],这些特征直接反映了体系在实空间中的对称性破缺行为,为理解其微观机制提供了关键线索。

2023 年, Yazdani 团队^[91]借助 STM/STS 对魔角双层石墨烯进行系统研究。他们发现,无论是在 $\nu = \pm 2$ 时的关联绝缘态还是超导态下,系统在原子尺度均呈现出 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}R30^\circ$ CDW 调制,表明其基态为全局关联态。其中实空间探测到 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}R30^\circ$ 的电荷密度振荡,其本质来源于石墨烯中两个能谷 (K 谷和 K' 谷)之间的电子散射,直接证实了谷相干态(谷相干,两个能谷的电子态发生量子相干叠加)的存在。为了解析其中蕴含的相位信息,研究团队对大量不同填充因子下,不同堆垛区域的 STM 图像进行傅里叶变换分析(图 3(a)),识别出由对称性破缺(如谷相干, intervalley coherent, IVC))引起的倒格点 Q_{IVC} 。通过选择性逆变换重构实空间序参量,并依据 C_{3V} 点群对称性将其分解为 6 个独立的复序参量,其中 3 个序参量 (IVC bond, IVC site A, IVC site B) 源自谷相干矢量 Q_{IVC} 。而这 3 个序参量可完整涵盖 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}R30^\circ$ 电荷密度调制在石墨烯晶格对称性条件下所有平移和旋转变换特性。通过分别绘制各序参量的幅值与相位实空间分布,揭示不同对称通道在实空间中的纹理结构。进一步分析表明,样品中应变主导了体系中相位的宏观分布(图 3(b)):在低应变样品中,各序参量相位近乎均匀,符合时间反演对称的谷相干序 (time-reversal symmetric intervalley coherent, T-IVC) 特征;在

高应变样品中,谷相干序参量相位呈条纹状调制,相邻 AA 堆垛区域序参量存在 $\Delta\theta = 2\pi/3$ 相位差。并在扣除背景后显现出涡旋-反涡旋晶格特征,与 Kekulé 螺旋序理论预言高度吻合。这一基于群论对称性的分析方法,成功从 STM 图像中识别出复杂的对称性破缺态,为理解魔角石墨烯中关联序的微观机制提供了关键依据。

2024 年, Renard 团队^[92]通过 STM 观测到,石墨烯表面氢原子缺陷诱导谷间散射,并在实空间调制出具有 Kekulé 结构的 CDW。并且该区域被畴壁分割为 3 个畴区(图 3(c))。研究人员借助几何相位分析的方法,基于对称性将 STM 形貌中的 Kekulé 序对应的序参量分解到不同的不可约表示,从而重构出键序振幅(图 3(d))和相位(图 3(e))的实空间分布。结果表明,键序相位环绕缺陷发生 2π 的相位累积,形成一个完整的 Kekulé 相位涡旋。该涡旋的拓扑特性表明,氢原子在该体系中等效于一个拓扑缺陷,STM 针尖围绕缺陷扫描后等效于在动量空间中环绕相位奇点(狄拉克点)进行旋转。因此,实验中观测到的 Kekulé 的 2π 相位涡旋,同样为单层石墨烯具有 π 的贝里相位提供了直接证据。

5 基于二维锁相技术研究量子相位

在非常规超导体中,PDW 等序参量的相位结构与拓扑缺陷关联。为精确提取这种空间调制的相位信息,“二维锁相技术”这一更强大的空间滤波与相位解析工具应运而生。非常规超导体因复杂的电子关联与多重对称性破缺而备受关注。与常规超导体不同,非常规超导体可能自发出现对称性破缺,导致超导序参量在空间呈现周期性调制,形成 PDW^[93]。PDW 是一种非均匀超导态,其核心特征为库珀对具有非零的质心动量,导致超导序参量在实空间中呈现周期性调制。近年来,在铜基^[94-99]、铁基^[100-106]、笼目^[107-112]、部分二维^[113-116]以及自旋三重态超导体^[117]等多种材料中均已观测到 PDW 的身影。其不仅打破了 $U(1)$ 规范对称性,还可能打破平移对称性或时间反演对称性,其相位结构因此成为理解其拓扑性质和微观机制的关键。随着 STM/STS 技术的发展,有关 PDW 相位的研究取得了重要突破。下文将基于 STM 技术,结合二维锁相技术,系统梳理有关 PDW 相位研究的主要方法与思路。

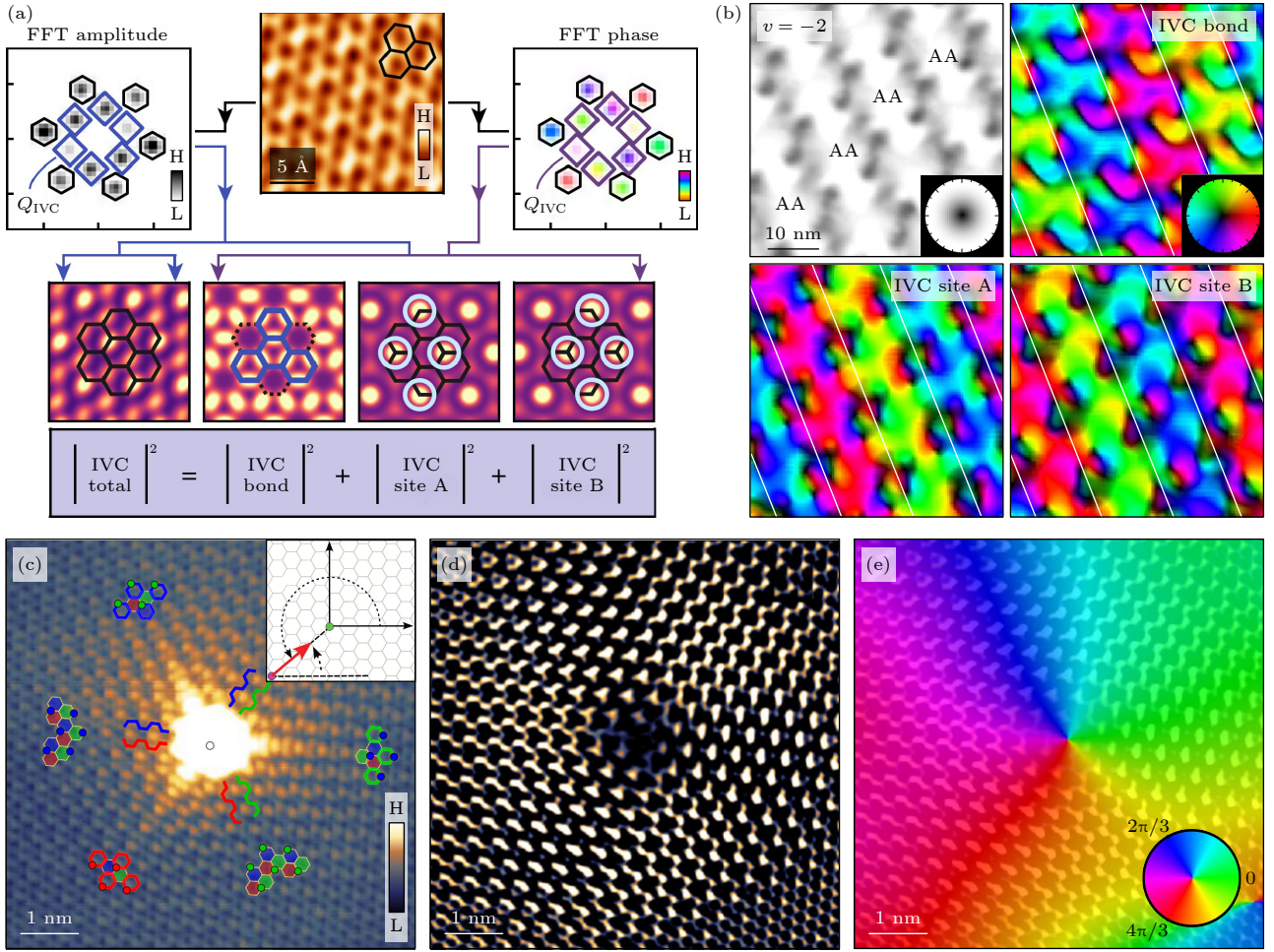


图3 利用序参量分解研究相位信息 (a) 基于快速傅里叶变换对局域序参量进行分解的示意图, 序参量可进一步分解为3个谷相干分量, 各分量的幅值在其正交方向上组合, 共同构成总的谷相干序参量^[91]; (b) 魔角双层石墨烯在填充因子为-2时的谷相干序参量空间分布, 其中, 左上角图片展示了谷相干波函数的全局强度; 谷相干键、谷相干位点A与谷相干位点B图则揭示了其空间分布模式, 相应的相位信息反映了图样的具体形状^[91]; (c) 吸附氢原子石墨烯的STM形貌图^[92]; (d) 提取得到的凯库勒键序信号^[92]; (e) 图(c)中凯库勒键序信号的相位信息^[92]

Fig. 3. Probing phase information via order-parameter decomposition: (a) Schematic illustration of decomposing a local order parameter based on FFT. The order parameter can be further resolved into three intervalley coherent components, whose amplitudes are combined along mutually orthogonal directions to form the total IVC order parameter^[91]. (b) Spatial distribution of the valley-coherent order parameter in magic-angle twisted bilayer graphene at $\nu = -2$. The upper-left panel shows the global intensity of the valley-coherent wave function, while the IVC bond, IVC site A, and IVC site B maps reveal its spatial patterns; the corresponding phase information encodes the detailed shapes of these patterns^[91]. (c) STM topographic image of graphene with hydrogen adatoms^[92]. (d) Extracted Kekulé bond-order signal^[92]. (e) Phase information of the Kekulé bond-order signal in panel (c)^[92].

在 Ginzburg-Landau 理论框架下, PDW 序参量可写为^[118]:

$$\Delta(r) = \Delta_Q e^{iQ \cdot r} + \Delta_{-Q} e^{-iQ \cdot r},$$

其中, Δ_Q 为复振幅, 相位项 $e^{iQ \cdot r}$ 决定了序参量的空间周期性. 有理论工作指出^[118,119], PDW 的相位与诱导的 CDW 或自旋密度波 (spin density wave, SDW) 序参量之间存在内在联系:

$$\rho_Q \propto \Delta_Q \Delta_{-Q}^* + \text{c.c.}, \quad S_Q \propto i(\Delta_Q \Delta_{-Q}^* - \text{c.c.}).$$

这表明 CDW 和 SDW 的相位实际上反映了 PDW

分量的相位差. 其中, ρ_Q 为 CDW 序参量, S_Q 为 SDW 序参量. 因此, 通过探测 CDW 和 SDW 的相位, 可以间接推断 PDW 的相位结构, 尤其是当 PDW 本身难以被直接成像时.

2008 年, Agterberg 和 Tsunetsugu^[119] 的理论工作指出, PDW 中可能存在拓扑缺陷, 其拓扑缺陷可以是分数涡旋 (例如 $\Phi_0/2$ 或 $\Phi_0/4$), 并伴随 CDW 或 SDW 产生位错. 例如, 一个 $\Phi_0/2$ 涡旋在 PDW 中对应半个位错, 而在 CDW 中将对应一个位错, 类似于“半涡旋”. 即具有波矢 Q (图 4(a))

的 PDW 将会诱导出波矢为 $2Q$ (图 4(c)) 的 CDW; PDW 半位错产生的 π 相移 (图 4(b)) 将会诱导 CDW 位错产生 2π 的相位 (图 4(d)) 积累. 因此, PDW 和 CDW/SDW 电荷序之间的拓扑关联可以通过相位纹理来探究. 如果在实验上直接观测到这种相位或者位错之间的对应关系, 将进一步加深对

CDW 和 PDW 之间关系的理解.

探究 STM 图像的振幅和相位信息, 可以通过二维锁相技术来实现^[97,100], 该技术能够对电荷序的局部相位进行空间映射, 并检测相关的拓扑缺陷. 对于任意图像 $A(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{Q}} a_{\mathbf{Q}}(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r}}$, 其中 Q 为目标波矢, $a_{\mathbf{Q}}(\mathbf{r})$ 为振幅, 可得实空间复振幅为:

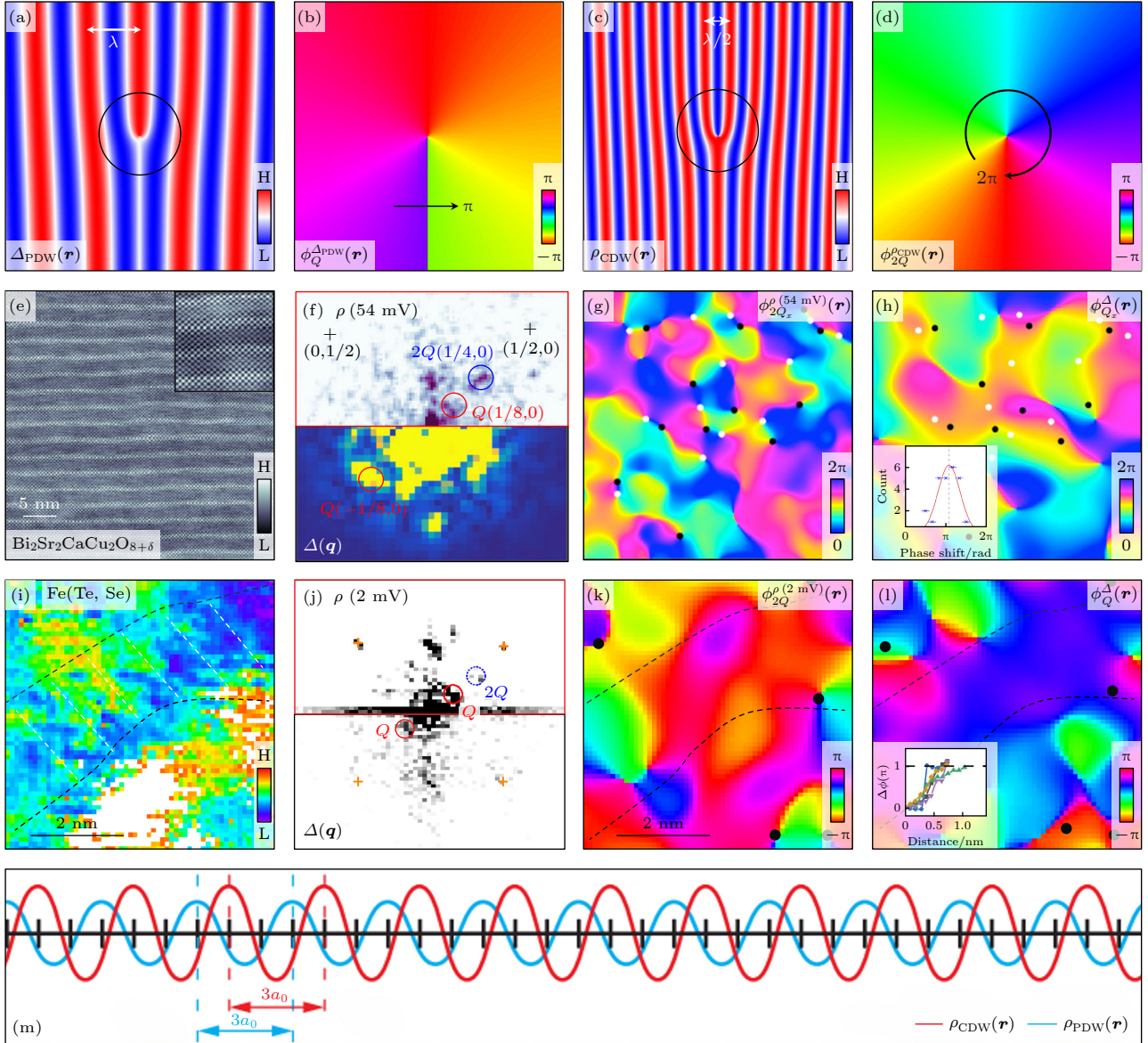


图 4 利用二维锁相技术探究 PDW 和 CDW 的相位 (a) PDW 半位错示意图^[100]; (b) 图 (a) 对应的相位信息^[100]; (c) CDW 位错示意图^[100]; (d) 图 (c) 对应的相位信息^[100]; (e) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 的 STM 形貌图^[97]; (f) 上下分别对应不同能量下傅里叶变换图^[97]; (g), (h) 分别表示波矢 $2Q$ 和 Q 对应的相位分布^[97]; (i) $\text{Fe}(\text{Te}, \text{Se})$ 薄膜超导能隙实空间分布^[100]; (j) 上下分别对应不同能量下傅里叶变换图^[100]; (k), (l) 分别表示波矢 $2Q$ 和 Q 对应的相位分布^[100]; (m) NbSe_2 中 CDW 与 PDW 对应的相位分布情况^[113]

Fig. 4. Probing the phase of PDW and CDW using 2D lock-in techniques: (a) Schematic illustration of a half-vortex in a PDW^[100]; (b) corresponding phase map for panel (a)^[100]; (c) schematic illustration of a dislocation in a CDW^[100]; (d) corresponding phase map for panel (c)^[100]; (e) STM topographic image of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ^[97]; (f) FFT at different energies, shown in the upper and lower panels, respectively^[97]; (g), (h) phase distributions corresponding to the wave vectors $2Q$ and Q , respectively^[97]; (i) real-space distribution of the superconducting energy gap in $\text{Fe}(\text{Te}, \text{Se})$ thin films^[100]; (j) FFT at different energies, shown in the upper and lower panels, respectively^[100]; (k), (l) phase distributions corresponding to the wave vectors $2Q$ and Q , respectively^[100]; (m) phase distributions of the CDW and PDW in NbSe_2 ^[113].

$$A_{\mathbf{Q}}(\mathbf{r}) = \int A(\mathbf{R}) e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{R}} e^{-\frac{(\mathbf{r}-\mathbf{R})^2}{2\sigma_r^2}} d\mathbf{R},$$

倒空间复振幅为:

$$\begin{aligned} A_{\mathbf{Q}}(\mathbf{r}) &= \mathcal{F}^{-1}(A_{\mathbf{Q}}(\mathbf{q})) \\ &= \mathcal{F}^{-1}\left[\mathcal{F}(A(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r}}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_q} e^{-\frac{q^2}{2\sigma_q^2}}\right], \end{aligned}$$

空间振幅和相位信息为:

$$\begin{aligned} |A_{\mathbf{Q}}(\mathbf{r})| &= \sqrt{[\text{Re}A_{\mathbf{Q}}(\mathbf{r})]^2 + [\text{Im}A_{\mathbf{Q}}(\mathbf{r})]^2}, \\ \Phi_{\mathbf{Q}}^A(\mathbf{r}) &= \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}A_{\mathbf{Q}}(\mathbf{r})}{\text{Re}A_{\mathbf{Q}}(\mathbf{r})}\right), \end{aligned}$$

其中, \mathcal{F} 为傅里叶变换, σ_r 和 σ_q 分别代表 \mathbf{r} 和 \mathbf{q} 空间的截止长度和截止频率, 借助傅里叶变换技术可过滤出仅保留波矢 \mathbf{Q} 附近调制成分的实空间分布图, 从而直接可视化与波矢 \mathbf{Q} 相关的空间调制行为。

随着空间与能量分辨率的不断提升, STM/STS 已发展为研究 PDW 的关键实验手段. 2020 年, Fujita 团队^[97] 利用 STM, 通过构建超导-绝缘体-超导结构, 对 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 样品进行系统表征 (图 4(e)). 通过测量微分电导 $dI/dV(\mathbf{r}, E)$ 获取局域电子态密度和超导能隙 $\Delta(\mathbf{r})$ 的空间分布, 直接观测到 $\Delta(\mathbf{q})$ 呈现出 $8a_0$ 的周期性调制 (图 4(f)). 进一步, 该团队采用二维锁相技术对实验数据进行分析, 发现 CDW 在波矢 $2\mathbf{Q}$ (图 4(g)) 的相位产生 2π 涡旋处总是对应 PDW (波矢 \mathbf{Q}) 相位发生 π 跳变的区域 (图 4(h)). 这一结果与“半涡旋”理论一致^[118,119]: 当 CDW 相位绕涡旋变化 2π 时, PDW 的相位变化 π , 形成所谓的半涡旋. 该工作不仅为 PDW 中的拓扑缺陷提供了直接实验证据, 同时也揭示了 PDW 与超导共同交织产生 CDW.

与铜基超导体类似, 铁基超导体中包含多种对称性破缺的电子态, 例如向列相序^[120] 等. 铁基超导体中是否存在 PDW 缺乏直接证据. 2023 年, 王健团队等^[100] 利用 STM/STS 对 $\text{Fe}(\text{Te}, \text{Se})/\text{SrTiO}_3$ 薄膜进行系统表征. 在样品畴壁处发现了周期约为 $3.6a_{\text{Fe}}$ (a_{Fe} 为铁原子间距) 的电子态调制, 通过绘制出局域态密度、超导序参量等物理量在实空间分布图 (图 4(i)), 进一步证实超导序参量在空间中存在周期性调制. 此外, 研究人员利用二维锁相技

术提取波矢 $2\mathbf{Q}$ (图 4(k)) 和 \mathbf{Q} (图 4(l)) 对应的相位. 通过相位分析, 在畴壁边界附近观测到 π 相位移动和由 PDW 诱导的次级 CDW 涡旋, 进一步揭示了 PDW 与诱导的 CDW 之间的拓扑关联, 直接表明 PDW 序作为母态的存在. 该研究结合二维锁相技术首次在铁基超导体中确认了 PDW 的存在, 同时表明低维体系中畴壁作为“嵌入式量子结构”在调控非常规超导序参量中的关键作用.

过渡金属硫族化合物是二维材料家族中的重要成员, 其层内以强共价键结合, 层间通过弱范德瓦耳斯力堆叠. 这类材料具有丰富的电学性质, 涵盖金属、半导体、绝缘体及超导体等多种态相. 部分过渡金属硫族化合物中存在 CDW^[113,121,122]、自旋/谷电子学特性^[82,123]、莫特绝缘相^[124-126] 以及超导电性^[113,124,127] 等强关联物态. 此外, 通过应变、电场、插层及堆垛等方式可对其物态进行有效调控, 使其成为研究二维极限下新奇量子物态及开发下一代光电子器件的理想平台. NbSe_2 作为该家族的代表性材料之一, 具有超导态、CDW 序和 PDW 序等多种有序相. 揭示这些电荷序间的关联与竞争机制, 同样是当前凝聚态物理研究中的重要课题.

2021 年, Séamus Davis 团队^[113] 采用约瑟夫森 STM, 在低温下对兼具 CDW 序和超导序的 NbSe_2 晶体进行表征. 通过测量零偏压附近的约瑟夫森微分电导, 研究人员直接观测到 PDW 受到母体 CDW 周期性调制, 从而证实了 PDW 的存在. 进一步, 团队借助傅里叶变换与二维锁相技术, 从配对密度图像 $N_{\text{C}}(\mathbf{r})$ 中提取出仅包含 PDW 调制的成分 $N_{\text{P}}(\mathbf{r})$, 发现 PDW 对应的调制波矢 \mathbf{Q}_{P} 与 CDW 对应的波矢 \mathbf{Q}_{C} 是一致的, 但两者在实空间中呈现出 $2\pi/3$ 的相位差 (图 4(m)), 表明 CDW 序与超导序共同交织产生 PDW 序. 此外, 他们基于 Ginzburg-Landau 理论分析了 PDW, CDW 和 s 波超导态之间的耦合机制, 并在涡旋中心处观察到二者序参量的相互衰减行为, 为 PDW 作为独立量子态提供了证据. 该工作首次在过渡金属硫族化合物中确认 PDW 存在, 揭示了其与 CDW、超导序在原子尺度的相互作用. 这不仅为理解非常规超导机制提供了新平台, 也预示 PDW 电荷序在同类材料中可能具有普遍性, 为探索交织量子序及非常规超导机理开辟了新途径.

表 1 4 类量子相位探测比较
Table 1. Comparison of quantum phase detection techniques.

| 类型 | 物理对象 | STM表征方式 | 特征 |
|--------|-------------|----------------------|---------------|
| AB几何相位 | 电子波函数相位积累 | 构建纳米干涉仪, 测量局域态密度周期振荡 | 局域态密度随磁场呈周期振荡 |
| 贝里相位 | 能谷赝自旋几何相位 | 缺陷诱导散射, 引起波前条纹变化 | 波前条纹数量变化 |
| 序参量复相位 | 谷相干序参量的相位结构 | 序参量分解与相位映射 | 相位涡旋 |
| PDW | 非常规超导序参量的相位 | 二维锁相技术提取波矢的相位 | 相位跳变 |

6 讨论与展望

STM 作为连接量子尺度与实空间观测的重要实验平台, 近年的技术进展已使其从传统的电子态密度探测手段演化为研究量子相位的核心工具. 本文围绕 AB 几何相位、石墨烯贝里相位、魔角石墨烯中多体序参量的复相位结构, 以及非常规超导体中的 PDW 相位等多个典型体系, 系统梳理了 STM/STS 在相位探测方面的发展与主要成果. 纵观这些研究, 一个共同的趋势愈加清晰: STM 的空间分辨能力使得各类抽象的量子相位得以在实空间实现可视化、定量化与拓扑化.

从技术方法的角度, 当前基于 STM 的相位探测形成了 4 种研究路径, 如表 1 所列: 1) 利用散射中心构建闭合电子运动路径, 测量局域态密度的磁通调制以探究 AB 相位; 2) 通过缺陷诱导的谷间散射与波前位错识别赝自旋涡旋, 直接在零磁场下测定石墨烯的贝里相位等; 3) 借助傅里叶变换并基于群论对称性, 将序参量分解重构复杂关联态的复序参量, 为多谷或多序交织的体系建立实空间的相位诊断标准; 4) 借助二维锁相技术实现局域相位映射, 实现空间局域滤波, 使 PDW 和 CDW 等电荷序的拓扑缺陷与相位关系得以精确刻画. 这些方法共同构成了一套可操作、可推广、可跨材料体系的相位探测框架, 使相位这个原本只能通过动量空间跃迁、输运量度或整体响应推断的量, 能够以局域、定向、能量分辨的方式直接呈现出来.

当前研究虽已取得重要进展, 但需指出的是, 通过傅里叶变换提取特定波矢频率时, 其结果显著依赖所采用的窗口函数、波矢强度及截止频率等参数. 例如, 在分析 CDW 调制结构时, 不同窗口函数 (如高斯窗、汉明窗) 可能增强或抑制特定波矢附近的信号, 影响相位提取的可靠性. 尽管傅里叶变换能够帮助我们揭示有关相位的物理, 但部分结果傅里叶变换后信号较弱, 与噪音水平相当, 使用该方法处理有关数据时需保持谨慎. 其次, 对于多

序参量共存的体系 (如 PDW-CDW-SDW 交织序或谷相干-应变耦合态), 序参量之间的竞争与协同往往会在实空间产生复杂的相位纹理, 发展更具物理约束的序参量分解策略或将成为解析此类多体问题的关键. 此外, 许多量子相位本质上受温度、应力、电场、磁场或局域缺陷条件影响, 如何通过原位调控实验实现相位的操控、驱动与重构, 将为理解其动力学与稳相机制提供新的窗口.

随着低温、更高能量分辨率、自旋极化 STM、约瑟夫森 STM、时间分辨 STM 和超快 STM 等技术发展, 量子相位的研究将不仅局限于静态测量, 更有望实现相位动力学、相位跃迁过程、非平衡相位纹理形成等更具前沿性的探索. 利用时间分辨/太赫兹 STM, 实时追踪超导序参量相位涨落、CDW 相滑移等瞬态过程; 利用 STM 针尖产生局域电场、磁场等, 调控二维超导、拓扑绝缘体边缘态或莫尔超晶格中的量子相位纹理. 同时, STM 的实空间相位探测能力也将对拓扑量子器件、量子材料的相位工程、以及基于相位的信息编码方案产生深远影响. 未来围绕量子相位的可视化、操控与拓扑化描述, STM 将继续承担不可替代的角色, 并在未来推动对非常规超导、强关联电子、多谷体系以及拓扑物态的理解迈向新的高度.

闫超, 现任南方科技大学物理系及量子功能材料全国重点实验室博士后. 本科毕业于兰州大学, 2024 年于北京师范大学获博士学位, 主要从事凝聚态物理量子物态与先进扫描隧道显微学研究.

殷嘉鑫, 现任南方科技大学物理系副教授, 同时就职于量子功能材料全国重点实验室及粤港澳大湾区量子科学中心. 2010 年本科毕业于中国科学技术大学, 2016 年获中国科学院物理研究所博士学位. 曾在美国休斯敦大学超导中心交流访问, 并在美国普林斯顿大学物理系历任博士后及副研究员, 2022 年全职加入南方科技大学. 主要致力于凝聚态物理和先进能谱显微学 (如超低温矢量磁场下的扫描隧道显微镜技术).

参考文献

- [1] Binnig G, Rohrer H, Gerber C, Weibel E 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 57
- [2] Tersoff J, Hamann D R 1985 *Phys. Rev. B* **31** 805
- [3] Binnig G, Rohrer H 1987 *Rev. Mod. Phys.* **59** 615
- [4] Aharonov Y, Bohm D 1959 *Phys. Rev.* **115** 485
- [5] Tonomura A, Matsuda T, Suzuki R, Fukuhara A, Osakabe N, Umezaki H, Endo J, Shinagawa K, Sugita Y, Fujiwara H 1982 *Phys. Rev. Lett.* **48** 1443
- [6] Chandrasekhar V, Rooks M J, Wind S, Prober D E 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 1610
- [7] Webb R, Washburn S, Umbach C, Laibowitz R 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 2696
- [8] Washburn S, Schmid H, Kern D, Webb R A 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 1791
- [9] van Oudenaarden A, Devoret M H, Nazarov Y V, Mooij J E 1998 *Nature* **391** 768
- [10] Hackens B, Martins F, Ouisse T, Sellier H, Bollaert S, Wallart X, Cappy A, Chevrier J, Bayot V, Huant S 2006 *Nat. Phys.* **2** 826
- [11] Peng H, Lai K, Kong D, Meister S, Chen Y, Qi X L, Zhang S C, Shen Z X, Cui Y 2010 *Nat. Mater.* **9** 225
- [12] Cho S, Dellabetta B, Zhong R, Schneeloch J, Liu T, Gu G, Gilbert M J, Mason N 2015 *Nat. Commun.* **6** 7634
- [13] Xu S G, Berdyugin A I, Kumaravadeivel P, Guinea F, Krishna Kumar R, Bandurin D A, Morozov S V, Kuang W, Tsim B, Liu S, Edgar J H, Grigorieva I V, Fal'ko V I, Kim M, Geim A K 2019 *Nat. Commun.* **10** 4008
- [14] Ronen Y, Werkmeister T, Haie Najafabadi D, Pierce A T, Anderson L E, Shin Y J, Lee S Y, Lee Y H, Johnson B, Watanabe K, Taniguchi T, Yacoby A, Kim P 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 563
- [15] Guo C Y, Wang K Z, Zhang L, Putzke C, Chen D, van Delft M R, Wiedmann S, Balakirev F F, McDonald R D, Gutierrez-Amigo M, Alkorta M, Errea I, Vergniory M G, Oka T, Moessner R, Fischer M H, Neupert T, Felser C, Moll P J W 2025 *Nature* **647** 68
- [16] Cano A, Paul I 2009 *Phys. Rev. B* **80** 153401
- [17] de Juan F, Cortijo A, Vozmediano M A H, Cano A 2011 *Nat. Phys.* **7** 810
- [18] Fu Z G, Zhang P, Li S S 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 243110
- [19] Fu Z G, Zhang P, Li S S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 133103
- [20] Ge Z, Slizovskiy S, Polizogopoulos P, Joshi T, Taniguchi T, Watanabe K, Lederman D, Fal'ko V I, Velasco J 2023 *Nat. Nanotechnol.* **18** 250
- [21] Yoffe A D 1993 *Adv. Phys.* **42** 173
- [22] Ashoori R C 1996 *Nature* **379** 413
- [23] Reimann S M, Manninen M 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 1283
- [24] Li S Y, He L 2022 *Front. Phys.* **17** 33201
- [25] Fu Z Q, Pan Y, Zhou J J, Bai K K, Ma D L, Zhang Y, Qiao J B, Jiang H, Liu H, He L 2020 *Nano Lett.* **20** 6738
- [26] Zheng Q, Zhuang Y C, Ren Y N, Yan C, Sun Q F, He L 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 076202
- [27] Zhou X F, Zhuang Y C, Zhang M H, Sheng H, Sun Q F, He L 2024 *Nat. Commun.* **15** 8786
- [28] Liu Y W, Ren Y N, Hao C Y, He L 2021 [arXiv: 2102.00164 \[cond-mat.mes-hall\]](https://arxiv.org/abs/2102.00164)
- [29] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Katsnelson M I, Grigorieva I V, Dubonos S V, Firsov A A 2005 *Nature* **438** 197
- [30] Zhang Y, Tan Y W, Stormer H L, Kim P 2005 *Nature* **438** 201
- [31] Castro Neto A H, Guinea F, Peres N M R, Novoselov K S, Geim A K 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 109
- [32] Novoselov K S, McCann E, Morozov S V, Fal'ko V I, Katsnelson M I, Zeitler U, Jiang D, Schedin F, Geim A K 2006 *Nat. Phys.* **2** 177
- [33] Young A F, Zhang Y, Kim P 2014 *Experimental Manifestation of Berry Phase in Graphene. In: Physics of Graphene (Cham: Springer)* pp3–27
- [34] Ghahari F, Walkup D, Gutiérrez C, Rodríguez-Nieva J F, Zhao Y, Wyrick J, Natterer F D, Cullen W G, Watanabe K, Taniguchi T, Levitov L S, Zhitenev N B, Strosio J A 2017 *Science* **356** 845
- [35] Pan W, Kang W, Baldwin K W, West K W, Pfeiffer L N, Tsui D C 2017 *Nat. Phys.* **13** 1168
- [36] Hou Z, Zhou Y F, Xie X C, Sun Q F 2019 *Phys. Rev. B* **99** 125422
- [37] Liu Y W, Hou Z, Li S Y, Sun Q F, He L 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 166801
- [38] Ren Y N, Cheng Q, Sun Q F, He L 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 206805
- [39] Rutter G M, Crain J N, Guisinger N P, Li T, First P N, Strosio J A 2007 *Science* **317** 219
- [40] Brihuega I, Mallet P, Bena C, Bose S, Michaelis C, Vitali L, Varchon F, Magaud L, Kern K, Veuillen J Y 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 206802
- [41] Mallet P, Brihuega I, Bose S, Ugeda M M, Gómez-Rodríguez J M, Kern K, Veuillen J Y 2012 *Phys. Rev. B* **86** 045444
- [42] Nye J F, Berry M V 1974 *Proc. A* **336** 165
- [43] Dutreix C, González-Herrero H, Brihuega I, Katsnelson M I, Chapelier C, Renard V T 2019 *Nature* **574** 219
- [44] Liu Y W, Zhuang Y C, Ren Y N, Yan C, Zhou X F, Yang Q, Sun Q F, He L 2024 *Nat. Commun.* **15** 3546
- [45] Zhang Y, Su Y, He L 2021 *Nano Lett.* **21** 2526
- [46] Zhang M H, Gao F, Lorentzen A B, Ren Y N, Zhang R H, Zhou X F, Dong R, Gao S W, Brandbyge M, He L 2024 *Phys. Rev. B* **110** L041405
- [47] Zhang S H, Yang J, Shao D F, Wu Z, Yang W 2021 *Phys. Rev. B* **103** L161407
- [48] Zhang S H, Yang J, Shao D F, Yang W, Chang K 2021 *Phys. Rev. B* **104** 245405
- [49] Yang J, Zhang S H, Yang W 2024 *Phys. Status Solidi-R* **18** 2300378
- [50] Park C H, Marzari N 2011 *Phys. Rev. B* **84** 205440
- [51] Yin L J, Li S Y, Qiao J B, Nie J C, He L 2015 *Phys. Rev. B* **91** 115405
- [52] Yin L J, Jiang H, Qiao J B, He L 2016 *Nat. Commun.* **7** 11760
- [53] Yang G, Li L, Lee W B, Ng M C 2018 *Sci. Tech. Adv. Mater.* **19** 613
- [54] Yan C, Zhao Y X, Liu Y W, He L 2023 *Nano Lett.* **23** 8532
- [55] Zhang Y, Su Y, He L 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 116804
- [56] Cao Y, Fatemi V, Demir A, Fang S, Tomarken S L, Luo J Y, Sanchez-Yamagishi J D, Watanabe K, Taniguchi T, Kaxiras E, Ashoori R C, Jarillo-Herrero P 2018 *Nature* **556** 80
- [57] Cao Y, Fatemi V, Fang S, Watanabe K, Taniguchi T, Kaxiras E, Jarillo-Herrero P 2018 *Nature* **556** 43
- [58] Yankowitz M, Chen S, Polshyn H, Zhang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Graf D, Young A F, Dean C R 2019 *Science* **363** 1059
- [59] Lu X, Stepanov P, Yang W, Xie M, Aamir M A, Das I, Urgell C, Watanabe K, Taniguchi T, Zhang G, Bachtold A, MacDonald A H, Efetov D K 2019 *Nature* **574** 653

- [60] Sharpe A L, Fox E J, Barnard A W, Finney J, Watanabe K, Taniguchi T, Kastner M A, Goldhaber-Gordon D 2019 *Science* **365** 605
- [61] Kerelsky A, McGilly L J, Kennes D M, Xian L, Yankowitz M, Chen S, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Dean C, Rubio A, Pasupathy A N 2019 *Nature* **572** 95
- [62] Choi Y, Kemmer J, Peng Y, Thomson A, Arora H, Polski R, Zhang Y, Ren H, Alicea J, Refael G, von Oppen F, Watanabe K, Taniguchi T, Nadj-Perge S 2019 *Nat. Phys.* **15** 1174
- [63] Xie Y, Lian B, Jäck B, Liu X, Chiu C L, Watanabe K, Taniguchi T, Bernevig B A, Yazdani A 2019 *Nature* **572** 101
- [64] Jiang Y, Lai X, Watanabe K, Taniguchi T, Haule K, Mao J, Andrei E Y 2019 *Nature* **573** 91
- [65] Wong D, Nuckolls K P, Oh M, Lian B, Xie Y, Jeon S, Watanabe K, Taniguchi T, Bernevig B A, Yazdani A 2020 *Nature* **582** 198
- [66] Ren Y N, Zhang Y, Liu Y W, He L 2020 *Chin. Phys. B* **29** 117303
- [67] Andrei E Y, Efetov D K, Jarillo-Herrero P, MacDonald A H, Mak K F, Senthil T, Tutuc E, Yazdani A, Young A F 2021 *Nat. Rev. Mater.* **6** 201
- [68] Oh M, Nuckolls K P, Wong D, Lee R L, Liu X, Watanabe K, Taniguchi T, Yazdani A 2021 *Nature* **600** 240
- [69] Choi Y, Kim H, Lewandowski C, Peng Y, Thomson A, Polski R, Zhang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Alicea J, Nadj-Perge S 2021 *Nat. Phys.* **17** 1375
- [70] Choi Y, Kim H, Peng Y, Thomson A, Lewandowski C, Polski R, Zhang Y, Arora H S, Watanabe K, Taniguchi T, Alicea J, Nadj-Perge S 2021 *Nature* **589** 536
- [71] Xie Y, Pierce A T, Park J M, Parker D E, Khalaf E, Ledwith P, Cao Y, Lee S H, Chen S, Forrester P R, Watanabe K, Taniguchi T, Vishwanath A, Jarillo-Herrero P, Yacoby A 2021 *Nature* **600** 439
- [72] Liu J, Dai X 2021 *Nat. Rev. Phys.* **3** 367
- [73] Lin J X, Zhang Y H, Morissette E, Wang Z, Liu S, Rhodes D, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Li J I A 2022 *Science* **375** 437
- [74] Nuckolls K P, Yazdani A 2024 *Nat. Rev. Mater.* **9** 460
- [75] Phong V T, Mele E J 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 176404
- [76] Gao A, Nagaosa N, Ni N, Xu S Y 2025 arXiv: 2508.00469 [cond-mat.str-el]
- [77] Zhang S H, Yang J, Shao D F, Zhu J J, Yang W, Chang K 2024 *Phys. Rev. Lett.* **133** 036204
- [78] Zheng S H, Duan H J, Wang J K, Li J Y, Deng M X, Wang R Q 2020 *Phys. Rev. B* **101** 041408
- [79] Zhang S B, Li C A, Peña-Benitez F, Surówka P, Moessner R, Molenkamp L W, Trauzettel B 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 076601
- [80] Zhang S H, Yang J, Shao D F, Zhu J J, You W L, Yang W, Chang K 2025 arXiv: 2501.13588 [cond-mat.mes-hall]
- [81] Engström L, Simon P, Mesáros A 2025 *Phys. Rev. B* **111** 134505
- [82] Bawden L, Cooil S P, Mazzola F, Riley J M, Collins-McIntyre L J, Sunko V, Hunvik K W B, Leandersson M, Polley C M, Balasubramanian T, Kim T K, Hoesch M, Wells J W, Balakrishnan G, Bahramy M S, King P D C 2016 *Nat. Commun.* **7** 11711
- [83] Yin J X, Ma W, Cochran T A, Xu X, Zhang S S, Tien H J, Shumiya N, Cheng G, Jiang K, Lian B, Song Z, Chang G, Belopolski I, Multer D, Litskevich M, Cheng Z J, Yang X P, Swidler B, Zhou H, Lin H, Neupert T, Wang Z, Yao N, Chang T R, Jia S, Zahid Hasan M 2020 *Nature* **583** 533
- [84] Xu X, Yin J X, Ma W, Tien H J, Qiang X B, Reddy P V S, Zhou H, Shen J, Lu H Z, Chang T R, Qu Z, Jia S 2022 *Nat. Commun.* **13** 1197
- [85] Călugăru D, Regnault N, Oh M, Nuckolls K P, Wong D, Lee R L, Yazdani A, Vafek O, Bernevig B A 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 117602
- [86] Kang J, Vafek O 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 246401
- [87] Bultinck N, Khalaf E, Liu S, Chatterjee S, Vishwanath A, Zaletel M P 2020 *Phys. Rev. X* **10** 031034
- [88] Lian B, Song Z D, Regnault N, Efetov D K, Yazdani A, Bernevig B A 2021 *Phys. Rev. B* **103** 205414
- [89] Kwan Y H, Wagner G, Soejima T, Zaletel M P, Simon S H, Parameswaran S A, Bultinck N 2021 *Phys. Rev. X* **11** 041063
- [90] Hong J P, Soejima T, Zaletel M P 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 147001
- [91] Nuckolls K P, Lee R L, Oh M, Wong D, Soejima T, Hong J P, Călugăru D, Herzog-Arbeitman J, Bernevig B A, Watanabe K, Taniguchi T, Regnault N, Zaletel M P, Yazdani A 2023 *Nature* **620** 525
- [92] Guan Y, Dutreix C, González-Herrero H, Ugeda M M, Brihuega I, Katsnelson M I, Yazyev O V, Renard V T 2024 *Nat. Commun.* **15** 2927
- [93] Yin J X, Wang Q H 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 157401 (in Chinese) [殷嘉鑫, 王强华 2024 *物理学报* **73** 157401]
- [94] Hamidian M H, Edkins S D, Joo S H, Kostin A, Eisaki H, Uchida S, Lawler M J, Kim E A, Mackenzie A P, Fujita K, Lee J, Davis J C S 2016 *Nature* **532** 343
- [95] Ruan W, Li X, Hu C, Hao Z, Li H, Cai P, Zhou X, Lee D H, Wang Y 2018 *Nat. Phys.* **14** 1178
- [96] Edkins S D, Kostin A, Fujita K, Mackenzie A P, Eisaki H, Uchida S, Sachdev S, Lawler M J, Kim E A, Séamus Davis J C, Hamidian M H 2019 *Science* **364** 976
- [97] Du Z, Li H, Joo S H, Donoway E P, Lee J, Davis J C S, Gu G, Johnson P D, Fujita K 2020 *Nature* **580** 65
- [98] Wang S, Choubey P, Chong Y X, Chen W, Ren W, Eisaki H, Uchida S, Hirschfeld P J, Davis J C S 2021 *Nat. Commun.* **12** 6087
- [99] Wang Z, Li H, Fan S, Xu J, Yang H, Wen H H 2025 arXiv: 2503.24177 [cond-mat.supr-con]
- [100] Liu Y Z, Wei T H, He G Y, Zhang Y, Wang Z Q, Wang J 2023 *Nature* **618** 934
- [101] Wei T, Liu Y, Ren W, Wang Z, Wang J 2023 arXiv: 2305.17991 [cond-mat.supr-con]
- [102] Zhao H, Blackwell R, Thinel M, Handa T, Ishida S, Zhu X, Iyo A, Eisaki H, Pasupathy A N, Fujita K 2023 *Nature* **618** 940
- [103] Zhang Y, Yang L, Liu C, Zhang W, Fu Y S 2024 arXiv: 2406.05693 [cond-mat.supr-con]
- [104] Kong L, Papaj M, Kim H, Zhang Y, Baum E, Li H, Watanabe K, Taniguchi T, Gu G, Lee P A, Nadj-Perge S 2025 *Nature* **640** 55
- [105] Wei T H, Liu Y Z, Ren W, Liang Z, Wang Z Q, Wang J 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 027404
- [106] Ding C, Xu Z P, Jiao X T, Hu Y Q, Zhao W X, Yang L X, Jiang K, Wang L L, Jia J F, Hu J P, Xue Q K 2026 *Phys. Rev. Lett.* **136** 066502
- [107] Chen H, Yang H T, Hu B, Zhao Z, Yuan J, Xing Y Q, Qian G J, Huang Z H, Li G, Ye Y H, Ma S, Ni S L, Zhang H, Yin Q W, Gong C S, Tu Z J, Lei H C, Tan H X, Zhou S, Shen C M, Dong X L, Yan B H, Wang Z Q, Gao H J 2021 *Nature* **599** 222
- [108] Jiang K, Wu T, Yin J X, Wang Z Y, Hasan M Z, Wilson S

- D, Chen X H, Hu J P 2023 *Natl. Sci. Rev.* **10** nwac199
- [109] Deng H B, Qin H L, Liu G W, Yang T Y, Fu R Q, Zhang Z Y, Wu X X, Wang Z W, Shi Y G, Liu J J, Liu H X, Yan X Y, Song W, Xu X T, Zhao Y Y, Yi M S, Xu G, Hohmann H, Holbæk S C, Dürrnagel M, Zhou S, Chang G, Yao Y, Wang Q, Guguchia Z, Neupert T, Thomale R, Fischer M H, Yin J X 2024 *Nature* **632** 775
- [110] Yan X Y, Deng H B, Yang T Y, Liu G W, Song W, Miao H, Tu Z J, Lei H C, Wang S, Lin B C, Qin H L, Yin J X 2024 *Chin. Phys. Lett.* **41** 097401
- [111] Han X H, Chen H, Tan H X, Cao Z Y, Huang Z H, Ye Y H, Zhao Z, Shen C M, Yang H T, Yan B H, Wang Z Q, Gao H J 2025 *Nat. Nanotechnol.* **20** 1017
- [112] Di Sante D, Neupert T, Sangiovanni G, Thomale R, Comin R, Checkelsky J G, Zeljkovic I, Wilson S D 2026 *Rev. Mod. Phys.* **98** 015002
- [113] Liu X, Chong Y X, Sharma R, Davis J C S 2021 *Science* **372** 1447
- [114] Cao L, Xue Y C, Wang Y B, Zhang F C, Kang J, Gao H J, Mao J H, Jiang Y H 2024 *Nat. Commun.* **15** 7234
- [115] Wei L X, Xiao P C, Li F, Wang L, Deng B Y, Cheng F J, Zheng F W, Hao N, Zhang P, Ma X C, Xue Q K, Song C L 2025 *Phys. Rev. B* **112** L060503
- [116] Cheng F J, Lou C C, Chen A X, Wei L X, Liu Y, Deng B Y, Li F, Wang Z, Xue Q K, Ma X C, Song C L 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 166201
- [117] Aishwarya A, May-Mann J, Almoalem A, Ran S, Saha S R, Paglione J, Butch N P, Fradkin E, Madhavan V 2024 *Nat. Phys.* **20** 964
- [118] Berg E, Fradkin E, Kivelson S A 2009 *Nat. Phys.* **5** 830
- [119] Agterberg D F, Tsunetsugu H 2008 *Nat. Phys.* **4** 639
- [120] Chuang T M, Allan M P, Lee J, Xie Y, Ni N, Bud'ko S L, Boebinger G S, Canfield P C, Davis J C 2010 *Science* **327** 181
- [121] Barja S, Wickenburg S, Liu Z F, Zhang Y, Ryu H, Ugeda M M, Hussain Z, Shen Z X, Mo S K, Wong E, Salmeron M B, Wang F, Crommie M F, Ogletree D F, Neaton J B, Weber-Bargioni A 2016 *Nat. Phys.* **12** 751
- [122] Liu C Y, Zhao M, Wang Z, Gao C L 2024 *ACS Nano* **18** 32858
- [123] Xiao D, Liu G B, Feng W, Xu X, Yao W 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 196802
- [124] Sipos B, Kusmartseva A F, Akrap A, Berger H, Forró L, Tutiš E 2008 *Nat. Mater.* **7** 960
- [125] Li T X, Jiang S W, Li L Z, Zhang Y, Kang K F, Zhu J C, Watanabe K, Taniguchi T, Chowdhury D, Fu L, Shan J, Mak K F 2021 *Nature* **597** 350
- [126] Zeng Y H, Xia Z C, Kang K F, Zhu J C, Knüppel P, Vaswani C, Watanabe K, Taniguchi T, Mak K F, Shan J 2023 *Nature* **622** 69
- [127] Lu J M, Zheliuk O, Leermakers I, Yuan N F Q, Zeitler U, Law K T, Ye J T 2015 *Science* **350** 1353

INVITED REVIEW

Probing quantum geometric phase via scanning tunneling microscopy

YAN Chao^{1)†} GAO Muwei¹⁾ ZHAO Yue¹⁾ YIN Jiixin^{1)2)‡}

1) (*State Key Laboratory of Quantum Functional Materials, Department of Physics, and Guangdong Basic Research Center of Excellence for Quantum Science, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China*)

2) (*Quantum Science Center of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Shenzhen 518045, China*)

(Received 31 December 2025; revised manuscript received 3 February 2026)

Abstract

Quantum geometric phase is a fundamental physical quantity that characterizes the intrinsic properties of wave functions and quantum states, encoding critical information regarding the geometry, topology, and many-body correlations of a system. Traditionally, accessing this phase information has relied heavily on momentum-space probes or macroscopic transport measurements, making the direct visualization and quantification of quantum phases in real space a long-standing experimental challenge. In recent years, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/STS) has emerged as a powerful platform for directly probing quantum phases at the atomic scale, owing to its exceptional spatial resolution and sensitivity to local electronic states. This review summarizes the latest research progress of breakthroughs in STM-based quantum phase research, with a specific focus on four highly innovative methodologies and their corresponding experimental results.

We first discuss the probing of geometric phases via local Aharonov-Bohm (AB) interferometry, where nanoscale real-space interferometers constructed with STM enable direct resolution of coherent local density of states (LDOS) oscillations driven by external magnetic fluxes, allowing quantitative extraction of geometric phases. Next, we examine the resolution of topological phases through defect-induced backscattering; by carefully analyzing quasiparticle interference and associated wavefront dislocations around atomic defects, this approach enables direct extraction of topological invariants, such as winding numbers, and Berry phases without the need for an external magnetic field. We then describe the reconstruction of complex phase structures via order-parameter decomposition, highlighting advanced spatial decomposition techniques applied to strongly correlated and highly symmetric systems, such as magic-angle twisted bilayer graphene, which successfully disentangle intertwined orders and provide crucial experimental criteria for identifying microscopic ground states. Furthermore, we review the investigation of phase textures and topological defects using 2D lock-in techniques; applied to unconventional superconductors, these spatial filtering methods enable high-precision mapping of phase modulations in pair density wave (PDW) and charge density wave (CDW), and successfully visualize topological defects such as phase jumps, vortices, and half-dislocations. These transformative advances demonstrate that STM and associated analytical techniques effectively translate abstract mathematical quantum phases into visualizable, quantifiable real-space observables. This not only offers profound new experimental perspectives for decoding topological states of matter, symmetry breaking, and complex electronic correlations, but also lays a solid foundation for future phase engineering and the development of next-generation quantum devices.

Keywords: scanning tunneling microscope, Berry phase, charge density wave, pair density wave

DOI: [10.7498/aps.75.20251800](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251800)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251800](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251800)

† Corresponding author. E-mail: yan@sustech.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yinjx@sustech.edu.cn



扫描隧道显微镜中的量子相位研究

闫超 高沐伟 赵悦 殷嘉鑫

Probing quantum geometric phase via scanning tunneling microscopy

YAN Chao GAO Muwei ZHAO Yue YIN Jiabin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 120701 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251800

CSTR: 32037.14.aps.75.20251800

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251800>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于扫描隧道显微镜的低噪声前置电流放大器

Low-noise preamplifier for scanning tunneling microscope

物理学报. 2024, 73(13): 130702 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240560>

超导能隙振荡: 到底来自配对密度波还是拆对散射?

Superconducting gap modulations: Are they from pair density waves or pair-breaking scattering?

物理学报. 2024, 73(15): 157401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240807>

低维材料中的电荷密度波

Charge density waves in low-dimensional material

物理学报. 2022, 71(12): 127103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220052>

分子团簇在扫描隧道显微镜针尖与衬底形成的不同腔中的超辐射研究

Superradiance study of molecular clusters in different cavities formed by scanning tunneling microscope tip and substrate

物理学报. 2025, 74(7): 076102 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241720>

铜氧超导材料电荷密度波和元激发的共振非弹性X射线散射研究

Resonant inelastic X-ray scattering study of charge density waves and elementary excitations in cuprate superconductors

物理学报. 2024, 73(19): 197401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240983>

钒基笼目超导体

Kagome superconductors

物理学报. 2022, 71(11): 118103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220891>