

观点和展望

莫尔超晶格中的分数化拓扑量子态*

刘钊†

(浙江大学物理学院, 浙江近代物理中心, 杭州 310058)

(2024 年 7 月 25 日收到; 2024 年 9 月 6 日收到修改稿)

带有分数化准粒子激发的分数量子霍尔态是一种奇特的强关联拓扑量子物态, 自 1982 年在强磁场二维电子气中被首次观测到以来一直是凝聚态物理重要的前沿方向. 近年来, 有多个团队在基于过渡金属硫族化合物和石墨烯的莫尔超晶格中观测到了零磁场分数量子霍尔效应, 在莫尔超晶格中还发现了分数量子自旋霍尔效应的迹象. 这表明莫尔超晶格体系能够有效调控能带及相互作用, 是在零磁场条件下实现分数化拓扑量子态的理想平台. 本文简要论述了与此相关的研究进展和存在的挑战, 并对该领域未来可能的发展方向做出展望.

关键词: 莫尔超晶格, 分数陈绝缘体, 分数量子自旋霍尔效应, 非阿贝尔拓扑序

PACS: 73.43.-f, 05.30.Pr, 68.65.Cd, 73.63.-b

DOI: 10.7498/aps.73.20241029

CSTR: 32037.14.aps.73.20241029

1 引言

近日, 康奈尔大学 Mak 团队^[1]关于在双层转角二碲化钼 (MoTe_2) 构成的莫尔超晶格中观测到分数量子自旋霍尔效应迹象的文章在 *Nature* 发表, 并迅速引起关注. 这项工作通过对 2.1° 转角的样品进行输运测量, 在莫尔价带的空穴填充因子为 $\nu = 2, 4, 6$ 处观测到零霍尔电阻和量子化的两端电阻平台. 该输运现象可以用空穴填满两个能谷 (valley) 中一对、两对、以及三对陈数相反的价带所形成的整数量子自旋霍尔态解释. 更有趣的是, 文章在 $\nu = 3$ 处也观测到了零霍尔电阻和一个较弱的量子化两端电阻平台. 康奈尔大学团队认为这很有可能对应于两个互为时间反演的 $\nu = 3/2$ 分数陈绝缘体构成的分数量子自旋霍尔态. 鉴于偶数分母填充处的分数量子霍尔态可能带有非阿贝尔准粒子激发^[2], 这项工作首次展示了在莫尔超晶格中实现时间反演对称的非阿贝尔分数化拓扑量子态的

可能性.

此次康奈尔大学团队报告分数量子自旋霍尔效应迹象是近年来在莫尔超晶格中实现分数化拓扑量子态的一系列重要进展之一. 2023 年以来, 有多个国内外团队在基于二碲化钼和石墨烯的莫尔超晶格中观测到零磁场分数量子霍尔效应, 解除了分数量子霍尔效应对强磁场的依赖^[3-8]. 分数量子自旋霍尔效应迹象的出现更是有希望拓展莫尔超晶格中拓扑物态的范围, 这进一步表明莫尔超晶格体系是实现各种奇异分数化拓扑物态的理想平台.

2 分数陈绝缘体

20 世纪 80 年代, 随着半导体技术的发展, 人们可以在非常纯净的半导体界面上制备二维电子气, 整数和分数量子霍尔效应最初就是在极低温条件下被施加垂直强磁场的二维电子气中观测到的^[9,10]. 它们在输运上表现为量子化在 $h/(\nu e^2)$ 的霍尔电阻平台和零纵向电阻, 其中填充因子 ν 可以是整数或者特定的分数. 量子霍尔效应发生时电

* 国家自然科学基金 (批准号: 12374149, 12350403) 资助的课题.

† E-mail: zhaol@zju.edu.cn

子的状态超出了朗道从对称性的角度描述物质形态的范式. 尤其是分数量子霍尔态, 电子间的相互作用和朗道能级携带的非零陈数赋予其奇特的拓扑序^[11]. 拓扑序导致了分数量子霍尔态中带有分数电荷和遵循分数统计规律的任意子激发, 人们期待可以用非阿贝尔任意子实现受拓扑保护的量子计算方案^[12].

分数量子霍尔效应所需的强磁场增加了其实现和应用的难度. 解除分数量子霍尔效应对磁场的依赖是克服这一困难的关键. 对于整数量子霍尔效应, 1988 年, Haldane^[13] 已经提出了一个使之能够在零磁场下存在的紧束缚模型, 2013 年, 零磁场整数量子霍尔效应最终在带有铁磁和自旋轨道耦合的固体材料中被实现^[14]. 与之相比, 实现零磁场分数量子霍尔效应对材料的能带色散、拓扑、量子几何以及电子间相互作用要求更高. 这方面系统性的探索始于 2011 年^[15–18], 人们预言有希望在晶格体系色散较弱、带有非零陈数、且贝里曲率较均匀的能带中实现零磁场分数量子霍尔态, 并将其称为分数陈绝缘体^[19–22], 其对应的输运现象被叫作分数量子反常霍尔效应. 鉴于分数陈绝缘体对能带性质的要求较高, 寻找可以承载它的固体材料是一个挑战.

随着范德瓦耳斯异质结制造技术的快速发展, 莫尔超晶格体系作为实现各种关联电子效应的理想平台进入了人们的视野. 当两层二维材料堆叠在一起, 如果两层的晶格常数有微小的差别, 或者两层之间存在一个转角, 就会在实空间中形成比原本每层材料更大尺度的周期性样式, 叫作莫尔超晶格. 通过调节转角、施加外场、改变衬底、甚至更换材料自身, 人们可以对莫尔超晶格体系的能带结构高度调控^[23], 这恰好有希望满足分数陈绝缘体对能带性质的苛刻要求. 2020 年起, 有一系列理论工作预言在基于石墨烯和过渡金属硫族化合物的莫尔超晶格中可以存在分数陈绝缘体^[24–29]. 2023 年以来, 多个实验团队在双层转角二碲化钼或者菱方堆垛多层石墨烯-氮化硼莫尔超晶格中通过输运测量直接观测到了分数量子反常霍尔效应^[5–8], 这被认为是分数陈绝缘体的有力证据. 在这些实验中, 大部分霍尔电阻平台对应的填充因子与传统分数量子霍尔效应中的复合费米子序列相符合, 如 $\nu = 3/5, 2/3, 2/5, 3/7, 4/9$ 等, 但最近菱方堆垛六层石墨烯-氮化硼的一个实验观测到了偶数分母的 $\nu = 3/4$ 的霍尔电阻平台^[8], 这也许对应着 Moore-

Read 类型的非阿贝尔拓扑序, 非常值得进一步探索.

3 量子自旋霍尔效应

与传统分数量子霍尔态一样, 分数陈绝缘体是一种破坏时间反演对称性的分数化拓扑态. 对传统分数量子霍尔态而言, 时间反演对称性是由外加磁场来破坏的. 在零磁场下的莫尔超晶格中, 两个能谷互为时间反演共轭, 当分数陈绝缘体形成时, 时间反演对称性是由于粒子间相互作用产生了自发破缺, 即粒子自发极化在一个谷内. 因此莫尔超晶格中的分数陈绝缘体是相互作用、能带拓扑和时间反演对称性自发破缺共同作用的产物.

一个很自然的问题是, 能否实现时间反演对称的分数化拓扑态? 一种可能的方案是形成两个互为时间反演共轭且彼此独立的分数陈绝缘体. 该方案的整数版本即为整数量子自旋霍尔态: 自旋相反的粒子在自旋守恒的条件下形成了两个互为时间反演共轭且彼此独立的整数量子霍尔态^[30–32]. 在这种情况下, 自旋向上、向下的粒子在系统边界上形成反向传播的螺旋边界模. 与量子霍尔态/陈绝缘体的手征边界模不同, 螺旋边界模使得量子自旋霍尔态的霍尔电导为 0, 但在两端输运测量中表现出量子化的电导, 该电导为单自旋量子霍尔电导的 2 倍.

在莫尔超晶格中, 如果粒子等权重占据互为时间反演共轭的两个能谷, 则很有希望形成整数和分数的量子自旋霍尔态. 此次康奈尔大学团队在较难制备的小转角 (2.1°) 双层转角二碲化钼中, 对价带加入空穴, 在填充因子 $\nu = 2, 4, 6$ 处观测到了整数量子自旋霍尔效应, 其特征为零霍尔电阻和量子化在 $\nu e^2/h$ 的两端电导平台. 该结果与基于单电子能带的预期相符: 密度泛函计算指出小转角时材料在 $K(K')$ 谷中的前三条低能价带的陈数都是 $1(-1)$ ^[33]. 填充因子 $\nu = 2, 4, 6$ 对应于两个谷中陈数相反的一对、两对、以及三对互为时间反演共轭的价带被空穴填满. 由于小转角时两个谷之间近似独立, 所以系统会形成整数量子自旋霍尔态 (这里的“自旋”实际上是谷), 分别是陈数为 $\pm 1, \pm 2, \pm 3$ 的两个互为时间反演共轭且彼此独立的整数陈绝缘体的组合, 这就可以解释实验中观测到的零霍尔电阻和量子化两端电导.

康奈尔大学团队的这项工作中最值得注意的成果是在 $\nu = 3$ 处也观测到了量子自旋霍尔效应的迹象. $\nu = 3$ 对应于两个谷中的一对第二价带整体被空穴半填充. 如果这时出现量子自旋霍尔效应, 则意味着空穴并没有极化在一个谷且填满其中的第二价带, 而是将两个谷中的第二价带各填充一半. 这样的填充方式只可能是空穴间相互作用的效应. 考虑到一些理论工作指出小转角时材料的第二价带接近二维电子气中的第二朗道能级^[33-35], 第二价带半填充时的基态有可能是非阿贝尔分数量子自旋霍尔态, 对应于 2 个互为时间反演共轭的 Moore-Read^[2] 类型的非阿贝尔分数陈绝缘体^[36]. 除了 Moore-Read 类型的分数量子自旋霍尔态以外, 也有理论工作提出了其他阿贝尔和非阿贝尔候选态^[37-41].

4 总结与展望

自 2023 年以来一系列在莫尔超晶格中观测到零磁场分数量子反常霍尔效应的实验, 以及康奈尔大学团队得到分数量子自旋霍尔效应迹象的实验, 都表明莫尔超晶格是在更宽松实验条件下实现分数化拓扑量子态、以及研究相互作用、拓扑、量子几何、对称性破缺综合效应的理想平台. 该领域的前景十分广阔. 当然, 对这些实验结果的解读和进一步的分析, 也对下一阶段的实验和理论研究提出了挑战.

在分数量子反常霍尔效应方面, 非常值得注意的一点是实验所观测到的霍尔电阻的平台质量与传统砷化镓样品中施加强磁场的分数量子霍尔效应相比还有相当的差距, 尤其在霍尔电阻出现的平台区域, 纵向电阻并没有下降到接近 0 的程度, 这些现象有待解释, 至少说明在材料质量和器件制备 (尤其是接触) 方面还有较大的改进空间. 在改进之后, 可以考虑进一步搜索非阿贝尔态, 以及进行准粒子干涉实验.

当前对莫尔材料中分数陈绝缘体的理论研究面临的主要任务之一是从微观哈密顿量出发尽可能多地解释和理解实验现象 (例如, 对双层转角二碲化钼^[42-45]). 在构建微观模型的过程中, 人们发现一些技术细节, 如材料能带的计算、能带混合的考虑程度、以及避免相互作用在能带计算和多体计算时被重复计入采用的扣减方案等, 对理论结果会

造成很大甚至是定性的影响, 这无疑增大了理论研究莫尔超晶格中分数陈绝缘体的难度. 另外, 精确对角化数值计算中系统尺寸的受限也使得理论研究有时无法取得确定的结论. 如果这些困难可以被克服, 我们就可以对分数陈绝缘体在莫尔超晶格中的稳定性和竞争相、非阿贝尔分数陈绝缘体的可能性、拓扑序与电荷序的纠缠等诸多有趣的问题获得更深刻的理解.

以上提及的理论研究困难在菱方堆垛五层石墨烯-氮化硼莫尔超晶格中尤其显著. 之前的实验表明该体系在电子填充 $\nu \leq 1$ 处存在整数和若干分数量子反常霍尔效应^[7]. 但不同于双层转角二碲化钼, 菱方堆垛五层石墨烯-氮化硼在单电子层面上并不存在孤立的带有陈数 $C = 1$ 的导带^[46], 因此这些量子反常霍尔效应无法用非相互作用能带被电子填充来理解. 另外, 实验中观测到的量子反常霍尔效应都发生在电子因强外电场远离氮化硼时, 这使得莫尔超晶格对这些拓扑态的形成所起的作用并不明显. 有理论工作在该体系的能带计算中进一步使用平均场考虑了相互作用对单电子能带的重构, 在 $\nu = 1$ 时得到了相互作用诱发的陈数 $C = 1$ 的导带, 并展示该能带被分数填充时可以形成分数陈绝缘体^[47-50]; 其中的一些工作发现 $C = 1$ 的平均场导带在莫尔超晶格消失的极限下仍然存在^[48,49], 并将该导带被填满的状态解释为兼具连续平移对称性自发破缺和拓扑的“反常霍尔晶体”(也被称为拓扑魏格纳晶体), 此时莫尔超晶格只是提供了一个弱的外势来固定该晶体. 鉴于这种带有连续平移对称性自发破缺的反常霍尔晶体不同于通常的整数陈绝缘体, 寻找在其基础上形成的分数陈绝缘体有何特殊之处将会十分有趣. 然而, 也有理论工作发现在微观模型中采用不同的扣减方案避免相互作用被重复计入时会得到不同的结论, 指出莫尔超晶格有可能非常强地破坏了连续平移对称性, 从而对 $\nu = 1$ 反常霍尔晶体的图像提出了挑战^[51]. 最新的实验进一步发现菱方堆垛五层石墨烯-氮化硼 $\nu = 2/3$ 处的分数量子反常霍尔效应在更低温度或者其他莫尔尺寸的样品中会被 $C = 1$ 的整数量子反常霍尔效应取代^[52,53], 而数值计算在包含了多带混合效应后在精确对角化的能力范围内未能像之前的单带计算那样发现稳定的 $\nu = 2/3$ 分数陈绝缘体^[54]. 这些都表明, 在菱方堆垛五层石墨烯-氮化硼材料中仍然需要更多实验和细心的理论计算才能

理解之前为何能够观测到分数量子反常霍尔效应.

在分数量子自旋霍尔效应方面, 确认空穴填充 $\nu = 3$ 时双层转角二碲化钼系统的基态性质是当前最迫切的任务. 由于实验中观测到的 $\nu = 3$ 的两端电导平台与 $\nu = 2, 4, 6$ 相比并未充分地伸展, 压缩率测量显示此处能隙较小, 且温度需要低至 20 mK, 因此该现象是否对应于分数量子自旋霍尔效应仍需要实验工作提供更多的证据. 可以考虑的一个方面是利用局域探测手段^[55] 验证 $\nu = 3$ 时系统是否存在螺旋边界模. 在康奈尔大学团队的工作发表后, 有其他实验团队研究了 2.6° ^[56] 和 3.15° ^[57] 的双层转角二碲化钼, 发现 $\nu = 3$ 时体系呈现出铁磁而非量子自旋霍尔效应, 这进一步要求对分数量子自旋霍尔效应的存在性和稳定性进行细致的探索. 理论上需要迫切回答的问题是在 $\nu = 3$ 时空穴的非谷极化在何种条件下会发生, 即澄清非谷极化对转角、能带色散、能带混合、相互作用、乃至莫尔超晶格其他细节的依赖, 目前已有理论组开始在这个方面思考, 指出能谷之间短程相互作用被削弱对分数量子自旋霍尔效应的出现非常重要, 而能带混合有可能促进这种情况发生^[36,58]. 当然, 彻底回答这一问题仍然需要针对 $\nu = 3$ 双层转角二碲化钼进行细致的微观模型计算. 在此基础上, 可以进一步对空穴非谷极化时的候选拓扑序^[36–41] 进行区分.

可以说, 莫尔超晶格中的分数化拓扑态已经将拓扑理论、量子多体计算和材料科学等多个领域结合了起来. 这个方向目前的进展非常迅速, 竞争也很激烈. 除了前文已经提及的问题之外, 该领域的研究还需要回答一些极为基本的问题, 如: 分数陈绝缘体与传统的分数量子霍尔效应是否存在本质区别? 磁场的消失、高陈数的存在、粒子非谷极化能否带来更丰富的分数化现象? 莫尔超晶格在器件制备方面 (例如准粒子干涉仪、拓扑量子计算) 究竟具备多大的优势? 无疑, 这些问题将吸引凝聚态理论和实验对莫尔超晶格中的分数化拓扑态更多的关注.

感谢上海交通大学李昕昕教授和西湖大学朱伟教授的讨论和帮助.

参考文献

- [1] Kang K, Shen B, Qiu Y, Zeng Y, Xia Z, Watanabe K, Taniguchi T, Shan J, Mak K F 2024 *Nature* **628** 522
- [2] Moore G, Read N 1991 *Nucl. Phys. B* **360** 362
- [3] Cai J, Anderson E, Wang C, Zhang X, Liu X, Holtzmann W, Zhang Y, Fan F, Taniguchi T, Watanabe K, Ran Y, Cao T, Fu L, Xiao D, Yao W, Xu X 2023 *Nature* **622** 63
- [4] Zeng Y, Xia Z, Kang K, Zhu J, Knüppel P, Vaswani C, Watanabe K, Taniguchi T, Mak K F, Shan J 2023 *Nature* **622** 69
- [5] Park H, Cai J, Anderson E, Zhang Y, Zhu J, Liu X, Wang C, Holtzmann W, Hu C, Liu Z, Taniguchi T, Watanabe K, Chu J H, Cao T, Fu L, Yao W, Chang C Z, Cobden D, Xiao D, Xu X 2023 *Nature* **622** 74
- [6] Xu F, Sun Z, Jia T, Liu C, Xu C, Li C, Gu Y, Watanabe K, Taniguchi T, Tong B, Jia J, Shi Z, Jiang S, Zhang Y, Liu X, Li T 2023 *Phys. Rev. X* **13** 031037
- [7] Lu Z, Han T, Yao Y, Reddy A P, Yang J, Seo J, Watanabe K, Taniguchi T, Fu L, Ju L 2024 *Nature* **626** 759
- [8] Xie J, Huo Z, Lu X, Feng Z, Zhang Z, Wang W, Yang Q, Watanabe K, Taniguchi T, Liu K, Song Z, Xie X C, Liu J, Lu X 2024 *arXiv* 2405.16944
- [9] Klitzing K V, Dorda G, Pepper M 1980 *Phys. Rev. Lett.* **45** 494
- [10] Tsui D C, Stormer H L, Gossard A C 1982 *Phys. Rev. Lett.* **48** 1559
- [11] Wen X G 1995 *Adv. Phys.* **44** 405
- [12] Nayak C, Simon S H, Stern A, Freedman M, Das Sarma S 2008 *Rev. Mod. Phys.* **80** 1083
- [13] Haldane F D M 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2015
- [14] Chang C Z, Zhang J, Feng X, Shen J, Zhang Z, Guo M, Li K, Ou Y, Wei P, Wang L L, Ji Z Q, Feng Y, Ji S, Chen X, Jia J, Dai X, Fang Z, Zhang S C, He K, Wang Y, Lu L, Ma X C, Xue Q K 2013 *Science* **340** 167
- [15] Tang E, Mei J W, Wen X G 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 236802
- [16] Sun K, Gu Z, Katsura H, Sarma S D 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 236803
- [17] Neupert T, Santos L, Chamon C, Mudry C 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 236804
- [18] Sheng D N, Gu Z C, Sun K, Sheng L 2011 *Nat. Commun.* **2** 389
- [19] Regnault N, Bernevig B A 2011 *Phys. Rev. X* **1** 021014
- [20] Parameswaran S A, Roy R, Sondhi S L 2013 *C.R. Phys.* **14** 816
- [21] Bergholtz E J, Liu Z 2013 *Int. J. Mod. Phys. B* **27** 1330017
- [22] Neupert T, Chamon C, Iadecola T, Santos L H, Mudry C 2015 *Phys. Scr.* **2015** 014005
- [23] Yang W 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 060101 (in Chinese) [杨威 2023 *物理学报* **72** 060101]
- [24] Abouelkomsan A, Liu Z, Bergholtz E J 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 106803
- [25] Repellin C, Senthil T 2020 *Phys. Rev. Research* **2** 023238
- [26] Ledwith P J, Tarnopolsky G, Khalaf E, Vishwanath A 2020 *Phys. Rev. Research* **2** 023237
- [27] Liu Z, Abouelkomsan A, Bergholtz E J 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 026801
- [28] Crepel V, Fu L 2023 *Phys. Rev. B* **107** L201109
- [29] Li H, Kumar U, Sun K, Lin S Z 2021 *Phys. Rev. Research* **3** L032070
- [30] Kane C L, Mele E J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 226801
- [31] Bernevig B A, Zhang S C 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 106802
- [32] König M, Wiedmann S, Brüne C, Roth A, Buhmann H, Molenkamp L W, Qi X L, Zhang S C 2007 *Science* **318** 766
- [33] Wang C, Zhang X W, Liu X, Wang J, Cao T, Xiao D 2024 *arXiv* 2404.05697

- [34] Reddy A P, Paul N, Abouelkomsan A, Fu L 2024 *arXiv* 2403.00059
- [35] Ahn C E, Lee W, Yananose K, Kim Y, Cho G Y 2024 *arXiv* 2403.19155
- [36] Abouelkomsan A, Fu L 2024 *arXiv* 2406.14617
- [37] Sodemann Villadiego I 2024 *Phys. Rev. B* **110** 045114
- [38] Zhang Y H 2024 *arXiv* 2402.05112
- [39] Jian C M, Cheng M, Xu C 2024 *arXiv* 2403.07054
- [40] May-Mann J, Stern A, Devakul T 2024 *arXiv* 2403.03964
- [41] Zhang Y H 2024 *arXiv* 2403.12126
- [42] Wang C, Zhang X W, Liu X, He Y, Xu X, Ran Y, Cao T, Xiao D 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 036501
- [43] Reddy A P, Alsallom F, Zhang Y, Devakul T, Fu L 2023 *Phys. Rev. B* **108** 085117
- [44] Yu J, Herzog-Arbeitman H, Wang M, Vafek O, Andrei Bernevig B, Regnault N 2024 *Phys. Rev. B* **109** 045147
- [45] Xu C, Li J, Xu Y, Zhang Y 2024 *PNAS* **121** e2316749121
- [46] Herzog-Arbeitman J, Wang Y, Liu J, Tam P M, Qi Z, Jia Y, Efetov D K, Vafek O, Regnault N, Weng H, Wu Q, Bernevig B A, Yu J 2024 *Phys. Rev. B* **109** 205122
- [47] Dong Z, Patri A S, Senthil T 2023 *arXiv* 2311.03445
- [48] Zhou B, Yang H, Zhang Y H 2024 *arXiv* 2311.04217
- [49] Dong J, Wang T, Wang T, Soejima T, Zaletel M P, Vishwanath A, Parker D E 2024 *arXiv* 2311.05568
- [50] Guo Z, Lu X, Xie B, Liu J 2023 *Phys. Rev. B* **110** 075109
- [51] Kwan Y H, Yu J, Herzog-Arbeitman J, Efetov D K, Regnault N, Bernevig B A 2023 *arXiv* 2312.11617
- [52] Lu Z, Han T, Yao Y, Yang J, Seo J, Shi L, Ye S, Watanabe K, Taniguchi T, Ju L 2024 *arXiv* 2408.10203
- [53] Waters D, Okounkova A, Su R, Zhou B, Yao J, Watanabe K, Taniguchi T, Xu X, Zhang Y H, Folk J, Yankowitz M 2024 *arXiv* 2408.10133
- [54] Yu J, Herzog-Arbeitman J, Kwan Y H, Regnault N, Bernevig B A 2024 *arXiv* 2407.13770
- [55] Ji Z, Park H, Barber M E, Hu C, Watanabe K, Taniguchi T, Chu J H, Xu X, Shen Z X 2024 *arXiv* 2404.07157
- [56] Park H, Cai J, Anderson E, Zhang X W, Liu X, Holtzmann W, Li W, Wang C, Hu C, Zhao Y, Taniguchi T, Watanabe K, Yang J, Cobden D, Chu J H, Regnault N, Bernevig B A, Fu L, Cao T, Xiao D, Xu X 2024 *arXiv* 2406.09591
- [57] Xu F, Chang X, Xiao J, Zhang Y, Liu F, Sun Z, Mao N, Peshchenko N, Li J, Watanabe K, Taniguchi T, Tong B, Lu L, Jia J, Qian D, Shi Z, Zhang Y, Liu X, Jiang S, Li T 2024 *arXiv* 2406.09687
- [58] Kwan Y H, Wagner G, Yu J, Dagnino A K, Jiang Y, Xu X, Bernevig B A, Neupert T, Regnault N 2024 *arXiv* 2407.02560

VIEWS AND PERSPECTIVES

Fractionalized topological states in moiré superlattices^{*}

Liu Zhao[†]

(Zhejiang Institute of Modern Physics, School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

(Received 25 July 2024; revised manuscript received 6 September 2024)

Abstract

Fractional quantum Hall (FQH) states with fractionalized quasiparticles are exotic topologically ordered quantum states driven by strong correlation between particles. Since the first discovery in 1982 in two-dimensional electron gases penetrated by strong magnetic fields, FQH physics has become an attractive frontier of condensed matter physics. Since last year, FQH transport at zero magnetic field has been observed in moiré superlattices based on transition metal dichalcogenides (TMDs) and graphene. Furthermore, the evidence of fractional quantum spin Hall effect has also been reported in TMD moiré superlattices. These results demonstrate that moiré superlattices are an ideal platform for controlling band structures and interactions to realize fractionalized topological states without the intervention of external magnetic fields. In this paper, we will briefly review the recent research progress on fractionalized topological states in moiré superlattices, summarize the existing challenges, and discuss possible future development of this field.

Keywords: moiré superlattice, fractional Chern insulators, fractional quantum spin Hall effect, non-Abelian topological order

PACS: 73.43.-f, 05.30.Pr, 68.65.Cd, 73.63.-b

DOI: 10.7498/aps.73.20241029

CSTR: 32037.14.aps.73.20241029

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12374149, 12350403).

[†] E-mail: zhaol@zju.edu.cn

莫尔超晶格中的分数化拓扑量子态

刘钊

Fractionalized topological states in moiré superlattices

Liu Zhao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 207303 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241029

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241029>

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

二维莫尔超晶格中的非线性霍尔效应

Nonlinear Hall effects in two-dimensional moiré superlattices

物理学报. 2023, 72(23): 237301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231324>

石墨烯莫尔超晶格的晶格弛豫与衬底效应

Lattice relaxation and substrate effects of graphene moiré superlattice

物理学报. 2022, 71(18): 187302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220872>

二维半导体莫尔超晶格中随位置与动量变化的层间耦合

Position- and momentum-dependent interlayer couplings in two-dimensional semiconductor moiré superlattices

物理学报. 2023, 72(2): 027302 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222046>

量子多体系统中的拓扑序与分数化激发

Topological order and fractionalized excitations in quantum many-body systems

物理学报. 2024, 73(7): 070301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240222>

转角二维量子材料中平带相关的新奇电子态物性

Physical properties of novel electronic states related to flat band in twisted two-dimensional quantum materials

物理学报. 2022, 71(12): 127202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220064>

二维范德瓦耳斯半导体莫尔超晶格实验研究进展

Recent experimental research progress of two-dimensional van der Waals semiconductor moiré superlattices

物理学报. 2022, 71(12): 127309 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220347>