

专题: 二维及拓扑自旋物理

磁序与拓扑的耦合: 从基础物理到拓扑磁电子学*

刘恩克†

(中国科学院物理研究所, 磁学国家重点实验室, 北京 100190)

(2023 年 10 月 26 日收到; 2023 年 12 月 23 日收到修改稿)

磁学与拓扑物理是两大较为成熟的学科, 二者的结合是新一代磁电子学的需求和基础. 磁性拓扑材料是磁序与拓扑物理耦合的重要产物, 为新兴的拓扑物理提供了材料载体和调控自由度. 磁性外尔半金属实现了时间反演对称破缺下的外尔费米子拓扑物态, 通过拓扑增强的贝利曲率产生了一系列新奇的磁/电/热/光效应; 而外尔电子与磁序的相互作用也使得拓扑电子物理有望成为磁电子学应用的新原理和驱动力. 当前, 新物态与新效应的发现是磁性拓扑材料第一阶段的主要任务和特征, 而动量空间拓扑电子与实空间磁序的相互作用已经开始进入人们的视野. 这两个阶段的深入发展, 将为拓扑磁电子学积累必要的物理基础和应用尝试. 本文着眼于磁性拓扑材料发展的两个阶段, 讲述磁性拓扑材料的提出和实现、均一磁序下的拓扑电子态及新奇物性、局域磁态与拓扑电子的相互作用 3 个方面, 阐述当前领域内的热点内容和发展趋势, 并对拓扑磁电子学的未来发展进行了思考和展望, 以助力未来拓扑自旋量子器件的快速发展.

关键词: 拓扑物理, 磁性外尔半金属, 拓扑磁电子学**PACS:** 71.55.Ak, 75.47.-m, 72.25.Ba, 72.80.-r**DOI:** 10.7498/aps.73.20231711

1 引言

面向人工智能与大数据的下一代电子功能器件是未来智能社会的重要基石. 这些电子器件涉及运算、存储、传感、传输等核心层面, 其高速度、高密度、高灵敏和高能效是未来智能社会大幅超越现阶段技术的迫切需求和重要特征. 而基于当前常规电路的电子学器件的速度和能效在面临高速处理和海量数据等需求中的制约已日趋严重. 过去十多年间, 以拓扑绝缘体、拓扑半金属为代表的拓扑电子物理的繁荣发展, 产生了拓扑表面态、狄拉克费米子、外尔费米子等一类拓扑电子态, 表现出高迁移率、低散射、高灵敏、手性保护、拓扑保护等一系列特性, 为未来功能器件的升级换代奠定了新的物

质基础. 相比于半导体物理近二十年的发展沉淀期, 拓扑物理也即将迎来类似的历史节点. 目前, 如何获得有效的应用出口是拓扑物理正面临的重大问题. 在磁学领域, 磁学与自旋电子学经历了长期的发展, 获得了丰富的成果和认知, 正朝着高密度、低能耗、高灵敏的目标前进, 对高性能应用的需求迫切而明确. 作为实空间中的拓扑磁态, 磁斯格明子也经历了十年的并行发展, 有望应用于新一代磁存储或逻辑运算.

这些学科的发展为拓扑物理与磁电子学的结合积累了成熟的基础. 目前, 磁序与拓扑物理的结合产生了两类有代表性的磁性拓扑材料, 即磁性外尔半金属和磁性拓扑绝缘体. 如果这些材料能够得到应用, 在拓扑磁电子器件及电路中, 常规性质的电子(载流子)将被拓扑电子所替代, 信息存储或

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2022YFA1403800, 2019YFA0704900)、国家自然科学基金基础科学中心(批准号: 52088101)、国家自然科学基金(批准号: 11974394)、中科院战略性先导科技专项 B 类(批准号: XDB33000000)和中国科学院依托大科学装置开展建制化科研(SECUF)项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ekliu@iphy.ac.cn

逻辑运算的传输效率将得到大幅提升,而成本和能耗也将得到大幅降低.

2 磁性拓扑材料的提出与实现

外尔半金属中的外尔费米子是一类重要的拓扑态,它由德国物理学家 Hermann Weyl 于 1929 年提出,长期以来未得到证实.直到 2011 年, Wan 等^[1]和 Xu 等^[2]在磁性材料中预测了一种遵循外尔方程的低能激发准粒子电子态.这种电子表现出零质量、高迁移率、具有手性、受能带的拓扑稳定性保护等新奇特征,在未来先进量子功能应用方面表现出潜在优势.外尔费米子的产生需要打破空间反演对称或者时间反演对称.在凝聚态物理中,前者对应非中心对称体系,而后者则对应自旋极化的磁性体系.在磁性材料中,存在着更多的相互作用,可以衍生出更丰富的拓扑相关物理行为.而磁学与自旋电子学长期以来的成熟积累和性能需求可与拓扑物理产生良好的对接.与此同时,磁性的引入也为拓扑物态的外磁场调控提供了一个有效而便利的手段.

2015 年,外尔费米子在中心对称破缺的非磁性半金属 TaAs 中被预测并证实^[3-5].这是自 80 多年前被提出后,首次被确认的外尔费米子.在拓扑材料的发展历程中,从拓扑绝缘体到拓扑半金属,非磁性拓扑材料的实现得到了理论的准确预测和实验的完美确证,而磁性外尔材料的发现则遇到了前所未有的困难.磁性材料中的绝大部分磁态都属于低能标物态,会形成复杂多样的磁结构和磁畴结构,使理论预测和实验表征面临很大挑战.因此,在一个体系中同时获得单一、简洁、可控的磁结构、畴结构和电子结构,是磁性外尔半金属实现的关键.

2018 年,磁性外尔半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 被提出并被实验证实^[6-9].它是一类具有低载流子浓度半金属特征的铁磁材料,构成 Kagome 晶格的 Co 原子同时承载了体系的磁序和外尔电子.在这类材料的体内,载流子由外尔费米子承担,而材料的表面则因表面态的存在而导电.这是第一个在实验上被证实的磁性外尔半金属,具有最为完备的实验证据和典型的拓扑特征.这也是继 2013 年实验上实现量子反常霍尔效应 (QAHE)^[10]之后,在块体材料中首次实现的磁序和拓扑物理的耦合 (图 1).同时,室温铁磁体 $\text{Co}_2\text{MnGa}/\text{Al}$ 、室温反铁磁体

$\text{Mn}_3\text{Sn}/\text{Ge}$ 等也被陆续发现为磁性外尔材料^[11,12].2019 年,发现本征磁性拓扑绝缘体 MnBi_2Te_4 , 其在拓扑绝缘体中实现了本征长程磁序^[13,14].研究者们在其单层和少层样品中陆续发现了 QAHE^[15-18],并提出了轴子绝缘体的概念^[19].

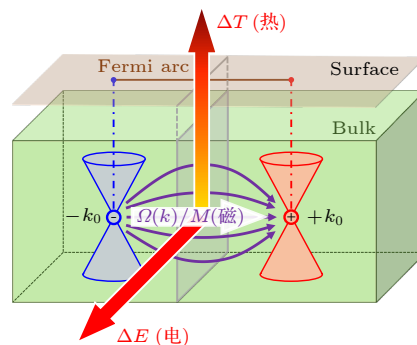


图 1 磁性拓扑材料及其物性自由度

Fig. 1. Magnetic topological material and the degrees of freedom of physical properties.

磁性拓扑材料的发现实现了本征磁序与拓扑物理在块体材料中的耦合,使得磁性拓扑材料成为多自由度的天然本征耦合体.这是磁学与拓扑物理学两大学科的融合,将带来丰富多样的新物态新效应,并将产生磁性拓扑物理与材料这一新方向.

3 均一磁序下的拓扑电子态及新奇物性

首个磁性外尔半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 的发现,开启了磁性拓扑物理发展的第一个阶段,它为诸多期待中的实验研究提供了优异的材料基础.在自旋轨道耦合作用下,由能带翻转形成的线性交叉的电子结构是外尔半金属的重要特征之一.这里既能产生非平庸的外尔电子,也能产生极强的贝利曲率效应,是许多优异物性或全新效应的起源 (图 2).

除了体态外尔费米子和拓扑表面态费米弧,研究者们还在磁性拓扑材料中发现了更新的物态.如, $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 中因硫原子缺位而引发的自旋-轨道极化子,未来有望作为功能基元而进行量子拓扑态的原子级定向构建和有序编织^[20],而某些特定的电子结构也为新材料和新器件的设计提供了理想的物质基础^[21].

特殊的能带结构导致了磁性拓扑半金属在电子输运上表现出优异的性能.在纵向输运上,低有效质量、高迁移率的载流子为电子的高速度、低能

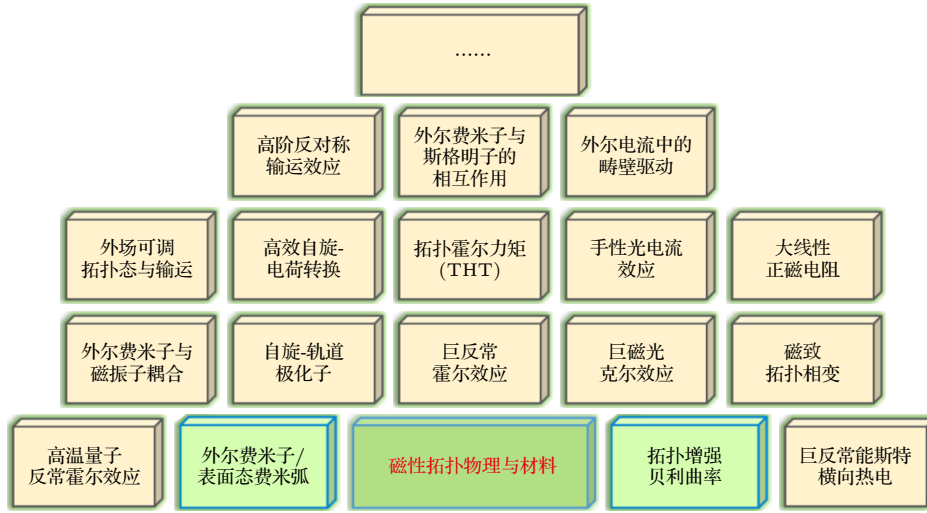


图 2 基于磁性拓扑物理与材料的丰富物性
Fig. 2. Rich effects based on the magnetic topological semimetal.

耗传输奠定了基础. 在横向输运上, 拓扑增强的贝利曲率带来了高的反常霍尔电导和大反常霍尔角^[6], 为反常霍尔电子器件和磁场传感器提供了候选. 同时, 强贝利曲率驱动的反常能斯特效应也比常规的磁性材料高出 1—2 个数量级^[22], 产生了拓扑热电新方向. 巨磁光科尔效应^[23] 也与磁性外尔的强贝利曲率密切相关. 由于拓扑能带主导了费米面, 掺杂的异类原子还可以对磁性拓扑体系拓扑能带的精细结构和贝利曲率进行调制, 从而引起内禀反常霍尔电导的显著提升^[24]. 拓扑增强的贝利曲率使得可以在大内禀反常霍尔效应的基础上, 大幅引入外禀贡献, 获得了高达 33% 的巨反常霍尔角^[25]. 这些都得益于磁性拓扑材料的大内禀反常霍尔电导的特点. 磁性拓扑材料中强贝利曲率的存在, 还产生了一系列非常规的输运行为^[26]. 在磁性外尔半金属 CoS_2 中, 费米能级处的贝利曲率可以导致纵向磁电阻随磁场线性增大, 产生线性正磁电阻^[27]. 由于磁性拓扑体系中外尔锥的倾斜, 还会出现奇对称的霍尔响应和纵向磁电阻行为, 呈现出磁场的一次方关系^[28,29]. 这是因为适用于磁性金属的半经典方程中一直被忽略的项, 在拓扑增强的贝利曲率作用下开始凸显出来, 产生了传统输运中罕见的新奇物理行为. 迹象表明, 更多的非常规输运行为将会被人们发现.

在磁性外尔半金属中, 磁与拓扑的相互作用还可以表现在动态的磁结构演化中. 磁性外尔半金属 EuB_6 磁矩转动过程中可能产生自旋倾斜效应, 对拓扑电子态和宏观电输运行为产生了同步调制^[30].

而在磁性外尔半金属 Co_2MnAl 中, 则出现了磁场引导磁矩转动导致外尔点出现和运动的现象^[31]. 这些都证实了在拓扑态与磁性共存的体系中, 磁态的演化对拓扑态可产生显著的调制. 室温反铁磁外尔材料在电控磁方面也取得了重要进展. 在 Mn_3Sn 作为核心层的异质结薄膜中, 利用其自身产生的自旋极化电流实现了电流驱动的磁畴翻转, 获得了反铁磁拓扑态的零磁场、全电学操控^[32-34]. 同时, 在 Mn_3Sn 全反铁磁隧道结中也实现了显著的室温隧穿磁电阻效应^[35], 而进一步的研究也在该体系中实现了斯格明子拓扑磁态^[36]. 这些研究为拓扑自旋电子学产生了重要成果.

磁性二维材料与拓扑物理的结合有望是磁电子学的一个新方向. 一个典型体系就是范德瓦耳斯磁性材料 Fe_3GeTe_2 , 它表现出了拓扑增强的输运行为^[37]、门电压可调的居里温度^[38] 和电流驱动的磁畴翻转^[39]; 而同家族的磁性二维材料 Fe_3GaTe_2 则展现出了室温本征铁磁性^[40], 在其异质结中发现了高达 85% 的室温隧穿磁电阻^[41], 有望获得拓扑相关的优异自旋电子学性能.

本征磁性拓扑绝缘体也获得了系统研究. 在 MnBi_2Te_4 家族中, 研究者们预测发现了多种拓扑物态, 包括量子反常霍尔态和轴子绝缘体^[42]. 伴随着 15 K 的较高居里温度, 奇数层的 Mn-Bi-Te 表现出铁磁序, 可以在几十开尔文的温区内观察到 AHE^[17]. 而在二维极限下, 磁性外尔半金属也有望打开外尔能带形成能隙出现高温 QAHE. 目前, 理论计算支持这一猜想^[43], 而扫描隧道谱研究也发现

了 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 解理晶面的台阶处存在手性边缘态形成的驻波信息, 这对应着二维极限下的 QAHE 态^[44].

磁性拓扑材料自实现以来, 经历了第一阶段的发展. 这一阶段的主要特征是在静态或准静态的均一磁序环境中, 由时间反演对称破缺而产生的丰富拓扑电子态和优异物理性能. 而第二阶段的一些特征, 如拓扑电子对局域磁态的影响, 已经开始浮现出来.

4 局域磁态与拓扑电子的相互作用

在自旋电子学材料中, 磁畴壁、斯格明子以及空间变化中的磁结构等局域磁态对载流子行为可以产生重要的影响, 而拓扑态电子对特定磁态的状态也会产生显著调制. 这进入了磁性拓扑物理发展的第二个阶段.

基于磁性外尔半金属的实现, 研究者们很快从理论上提出了诸多输运物理新效应. 研究发现, 基于外尔方程, 将局域磁态的磁矩写入哈密顿量后, 在运动的磁畴壁上会产生一个等效的电磁场, 泵浦出一个无损耗的电流, 而等效电磁场的方向与外尔电子的手性相关 (图 3)^[45]. 在磁性外尔半金属中, 相邻磁畴中外尔点的手性相反, 会导致费米面上的传导电子因手性失配而被显著散射, 可在畴壁区形成高达 100% 的畴壁磁电阻^[46]. 目前该效应尚未得到实验的证实.

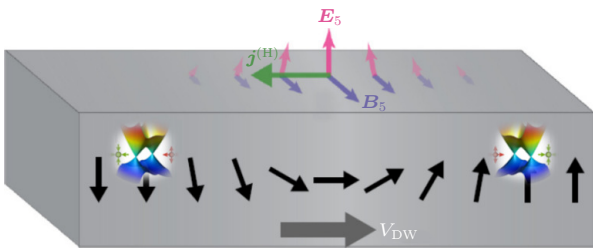


图 3 磁性外尔体系中磁畴壁上产生的轴向电磁场 (E_5 , B_5) 及诱发的霍尔电流 $j^{(H)}$ ^[45]
 Fig. 3. Schematic showing the axial electromagnetic fields (E_5 , B_5) and the Weyl-induced Hall current $j^{(H)}$, along with a Néel domain wall moving with velocity V_{DW} ^[45].

已有研究指出外尔电子可以对体系的螺旋磁结构产生调制^[47]. 更重要的是, 拓扑电子还可以对磁畴壁产生作用. 研究人员利用外尔电子的哈密顿量及半经典的输运方程, 获得了外尔体系中传导电子对局域磁矩的自旋力矩作用, 可以促进磁矩和磁

畴的高效翻转. 计算发现其磁畴驱动效率相比于传统金属材料有望高出一个数量级^[48,49].

2022 年, Wang 等^[50] 利用霍尔测量发现了 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 器件中的电流驱动磁畴翻转行为. 在磁场辅助下, 驱动磁畴运动的临界电流密度可低至 $1.5 \times 10^5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 自旋力矩效率高达 $2.4\text{--}5.6 \text{ kOe/MA}\cdot\text{cm}^2$, 这些性能指标均为目前最优, 在自旋电子学应用上表现出了巨大的潜力. 但因为 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 同时具备高磁各向异性、低饱和磁矩及高自旋极化率等特点, 采用经典模型即可解释磁畴翻转的优异性能, 尚不能证明外尔物理在其中的直接作用. 因此, 外尔物理驱动磁畴翻转的预期还需要进一步证实. 基于磁性外尔半金属, Araki 和 Ieda^[51] 还提出了拓扑霍尔力矩这一新效应. 该效应是外尔电子的有效磁场作用在畴壁中磁矩上的力矩, 它来源于动量空间的贝利曲率与实空间的局域磁态的相互作用, 是一种内禀属性, 对无序和热涨落不敏感. 相对于传统的自旋转移力矩和自旋轨道力矩, 该力矩有望表现出更高的驱动效率, 有望应用于高能效的新一代拓扑自旋电子学. 该效应自提出后, 已经得到了实验的初步验证^[52].

拓扑电子与局域磁态的相互作用是拓扑自旋电子学的核心内容, 它也使拓扑电子的物理行为和图像从动量空间进入了实空间范畴, 这将直接对自旋电子学产生重要影响.

5 拓扑磁电子学的兴起和思考

磁性拓扑材料及其应用是拓扑物理的一个重要出口, 也是磁学与磁性材料的一个前沿拓展, 目前已经在第一阶段产生了丰富的结果. 磁性拓扑物理最重要的发展方向之一是拓扑磁电子学 (图 4). 拓扑物理的到来为自旋电子材料的物性提升提供了新的原理, 为磁电子学在发展中积累的诸多基础问题的解决带来了原理性可能, 使得人们可以从底层物理层面思考其制约因素和突破口, 并形成新的物理机制和实验方案, 推动磁电子学的长足发展和高性能应用.

基于磁性拓扑材料, 动量空间中的拓扑电子态 (狄拉克费米子、外尔费米子、拓扑表面态、节线态、高阶拓扑态等) 与实空间非平庸磁态 (磁畴壁、手性磁结构、磁斯格明子等, 含均一磁序) 发生结合和相互作用, 产生演生的量子现象, 以及拓扑

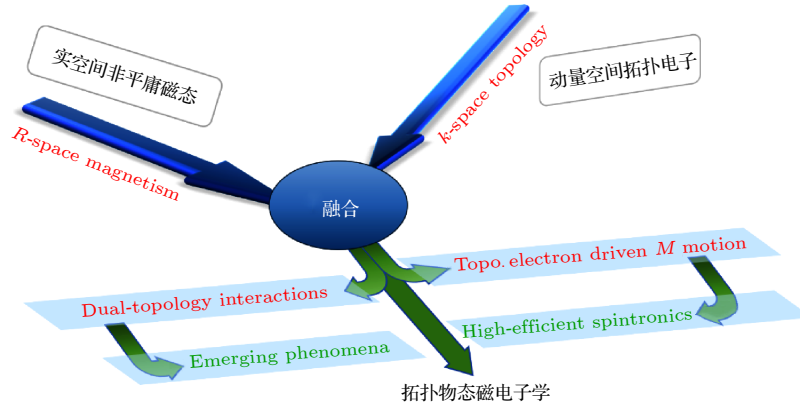


图 4 动量空间拓扑电子态与实空间非平庸磁态的耦合与作用

Fig. 4. Coupling and interaction between momentum-space topological electronic states and real-space nontrivial magnetic states.

电子驱动下的高能效磁电效应. 这其中包含三大类重要的形式: 均一磁序与拓扑电子的耦合和效应、拓扑电子与磁畴壁的耦合和驱动、外尔电子与斯格明子的耦合和驱动. 这三种形式将是未来重要的研究内容和方向.

1) 第一种作用. 作为磁性拓扑材料第一阶段的主要研究对象, 已产生了大量的新物态和新效应, 使得自旋电子材料原有物性得到了跨数量级的提升, 也产生了全新的物理效应. 基于第一种作用, 在块体材料、异质结及单层膜中开展研究, 探索磁电、光电、热电、磁光等磁电子学及其他功能应用, 将成为未来的研究热点. 同时, 寻找具有综合优异性能的新材料将是一个长期的重要任务.

2) 第二种作用. 在磁性外尔输运新理论的推动下, 有望最终实现超低临界电流密度、极高磁矩翻转效率, 甚至在单一材料器件中实现功能应用. 这将是未来拓扑电子在磁电子学领域中极其重要的作用形式.

3) 第三种作用. 外尔电流将与斯格明子产生作用, 并驱动其运动, 形成动量空间和实空间中双拓扑耦合新形态, 为拓扑自旋电子学的发展提供新的原理. 这需要研究双拓扑耦合的可能性、机制与形式, 以及外尔电子在斯格明子非共线局域磁态中的能量色散与拓扑稳定性等科学问题.

第二种作用和第三种作用将成为磁性拓扑物理在第二发展阶段的重要内容.

在此过程中, 磁学中一些新兴方向与拓扑物理的融合也将会继续发展. 磁性二维材料与拓扑物理的耦合有望出现更多的体系和效应, 成为拓扑磁电子学的一个重要组成. 交错磁性拓扑物理也有望

产生结合, 将与已有的反铁磁拓扑材料一起, 在反铁磁自旋电子学中发挥重要作用. 而基于高居里温度磁性拓扑材料的高温 QAHE 的实现, 则是基础物理领域和拓扑量子器件领域的共同期待.

借助拓扑物理的非传统电子行为, 磁性拓扑物理有望成为支撑未来磁电子学的重要基础和新一代拓扑物态磁电子学的鲜明特征. 未来, 研究者们需要进一步理解磁序与拓扑物理的作用机制和形式, 挖掘新的磁性拓扑物态与量子衍生效应, 突破现有磁电子学材料的性能极限, 探索磁电光热响应卓越的磁性拓扑材料和器件在信息存储、逻辑运算、信号传感、功率传输等方面的应用, 推动未来智能技术与智能社会的发展.

参考文献

- [1] Wan X, Turner A M, Vishwanath A, Savrasov S Y 2011 *Phys. Rev. B* **83** 205101
- [2] Xu G, Weng H, Wang Z, Dai X, Fang Z 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 186806
- [3] Weng H M, Fang C, Fang Z, Bernevig B A, Dai X 2015 *Phys. Rev. X* **5** 011029
- [4] Lü B Q, Xu N, Weng H M, Ma J Z, Richard P, Huang X C, Zhao L X, Chen G F, Matt C E, Bisti F, Strocov V N, Mesot J, Fang Z, Dai X, Qian T, Shi M, Ding H 2015 *Nat. Phys.* **11** 724
- [5] Xu S Y, Belopolski I, Alidoust N, Neupane M, Bian G, Zhang C L, Sankar R, Chang G Q, Yuan Z J, Lee C C, Huang S M, Zheng H, Ma J, Sanchez D S, Wang B K, Bansil A, Chou F C, Shibaev P P, Lin H, Jia S, Hasan M Z 2015 *Science* **349** 613
- [6] Liu E K, Sun Y, Kumar N, Muechler L, Sun A L, Jiao L, Yang S Y, Liu D F, Liang A J, Xu Q N, Kroder J, Süß V, Borrmann H, Shekhar C, Wang Z S, Xi C Y, Wang W H, Schnelle W, Wirth S, Chen Y L, Goennenwein S T B, Felser C 2018 *Nat. Phys.* **14** 1125
- [7] Wang Q, Xu Y F, Lou R, Liu Z H, Li M, Huang Y B, Shen D W, Weng H M, Wang S C, Lei H C 2018 *Nat. Commun.* **9** 3681

- [8] Liu D F, Liang A J, Liu E K, Xu Q N, Li Y W, Chen C, Pei D, Shi W J, Mo S K, Dudin P, Kim T, Cacho C, Li G, Sun Y, Yang L X, Liu Z K, Parkin S S P, Felser C, Chen Y L 2019 *Science* **365** 1282
- [9] Morali N, Batabyal R, Nag P K, Liu E, Xu Q, Sun Y, Yan B, Felser C, Avraham N, Beidenkopf H 2019 *Science* **365** 1286
- [10] Chang C Z, Zhang J S, Feng X, Shen J, Zhang Z C, Guo M H, Li K, Ou Y B, Wei P, Wang L L, Ji Z Q, Feng Y, Ji S H, Chen X, Jia J F, Dai X, Fang Z, Zhang S C, He K, Wang Y Y, Lu L, Ma X C, Xue Q K 2013 *Science* **340** 167
- [11] Sakai A, Mizuta Y P, Nugroho A A, Sihombing R, Koretsune T, Suzuki M T, Takemori N, Ishii R, Nishio-Hamane D, Arita R, Goswami P, Nakatsuji S 2018 *Nat. Phys.* **14** 1119
- [12] Nakatsuji S, Kiyohara N, Higo T 2015 *Nature* **527** 212
- [13] Gong Y, Guo J W, Li J H, et al. 2019 *Chinese Phys. Lett.* **36** 076801
- [14] Otrokov M M, Klimovskikh I I, Bentmann H, et al. 2019 *Nature* **576** 416
- [15] Li J H, Li Y, Du S Q, Wang Z, Gu B L, Zhang S C, He K, Duan W H, Xu Y 2019 *Sci. Adv.* **5** eaaw5685
- [16] Chen B, Fei F C, Zhang D Q, Zhang B, Liu W L, Zhang S, Wang P D, Wei B Y, Zhang Y, Zuo Z W, Guo J W, Liu Q Q, Wang Z L, Wu X C, Zong J Y, Xie X D, Chen W, Sun Z, Wang S C, Zhang Y, Zhang M H, Wang X F, Song F Q, Zhang H J, Shen D W, Wang B G 2019 *Nat. Commun.* **10** 4469
- [17] Deng Y J, Yu Y J, Shi M Z, Guo Z X, Xu Z H, Wang J, Chen X H, Zhang Y B 2020 *Science* **367** 895
- [18] Sun H Y, Xia B W, Chen Z J, Zhang Y J, Liu P F, Yao Q S, Tang H, Zhao Y J, Xu H, Liu Q H 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 096401
- [19] Liu C, Wang Y C, Li H, Wu Y, Li Y X, Li J H, He K, Xu Y, Zhang J S, Wang Y Y 2020 *Nat. Mater.* **19** 522
- [20] Xing Y Q, Shen J L, Chen H, Huang L, Gao Y X, Zheng Q, Zhang Y Y, Li G, Hu B, Qian G J, Cao L, Zhang X L, Fan P, Ma R S, Wang Q, Yin Q W, Lei H C, Ji W, Du S X, Yang H T, Wang W H, Shen C M, Lin X, Liu E K, Shen B G, Wang Z Q, Gao H J 2020 *Nat. Commun.* **11** 5613
- [21] Huang L, Kong X H, Zheng Q, Xing Y Q, Chen H, Li Y, Hu Z X, Zhu S Y, Qiao J S, Zhang Y Y, Cheng H X, Cheng Z H, Qiu X G, Liu E K, Lei H C, Lin X, Wang Z Q, Yang H T, Ji W, Gao H J 2023 *Nat. Commun.* **14** 5230
- [22] Guin S N, Vir P, Zhang Y, Kumar N, Watzman S J, Fu C, Liu E, Manna K, Schnelle W, Gooth J, Shekhar C, Sun Y, Felser C 2019 *Adv. Mater.* **31** 1806622
- [23] Okamura Y, Minami S, Kato Y, Fujishiro Y, Kaneko Y, Ikeda J, Muramoto J, Kaneko R, Ueda K, Kocsis V, Kanazawa N, Taguchi Y, Koretsune T, Fujiwara K, Tsukazaki A, Arita R, Tokura Y, Takahashi Y 2020 *Nat. Commun.* **11** 4619
- [24] Shen J L, Yao Q S, Zeng Q Q, Sun H Y, Xi X K, Wu G H, Wang W H, Shen B G, Liu Q H, Liu E K 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 086602
- [25] Shen J L, Zeng Q Q, Zhang S, Sun H Y, Yao Q S, Xi X K, Wang W H, Wu G H, Shen B G, Liu Q H, Liu E K 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2000830
- [26] Yang J Y, Wang B B, Liu E K 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 177103 (in Chinese) [杨金颖, 王彬彬, 刘恩克 2023 物理学报 **72** 177103]
- [27] Zhang S, Wang Y, Zeng Q Q, Shen J L, Zheng X, Yang J, Wang Z, Xi C, Wang B B, Zhou M, Huang R, Wei H, Yao Y, Wang S, Parkin S S P, Felser C, Liu E K, Shen B G 2022 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **119** e2208505119
- [28] Zeng Q Q, Yi C, Shen J L, Wang B B, Wei H, Shi Y, Liu E K 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 162405
- [29] Jiang B Y, Wang L, Bi R, Fan J W, Zhao J L, Yu D P, Li Z L, Wu X S 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 236601
- [30] Shen J L, Gao J C, Yi C J, Li M, Zhang S, Yang J Y, Wang B B, Zhou M, Huang R J, Wei H X, Yang H T, Shi Y G, Xu X H, Gao H J, Shen B G, Li G, Wang Z J, Liu E K 2023 *The Innovation* **4** 100399
- [31] Li P G, Koo J, Ning W, Li J G, Miao L X, Min L J, Zhu Y L, Wang Y, Alem N, Liu C X, Mao Z Q, Yan B H 2020 *Nat. Commun.* **11** 3476
- [32] Tsai H, Higo T, Kondou K, Nomoto T, Sakai A, Kobayashi A, Nakano T, Yakushiji K, Arita R, Miwa S, Otani Y, Nakatsuji S 2020 *Nature* **580** 608
- [33] Xie H, Chen X, Zhang Q, Mu Z Q, Zhang X H, Yan B H, Wu Y H 2022 *Nat. Commun.* **13** 5744
- [34] Deng Y C, Liu X H, Chen Y Y, Du Z Z, Jiang N, Shen C, Zhang E Z, Zheng H Z, Lu H Z, Wang K Y 2023 *Natl. Sci. Rev.* **10** nwac154
- [35] Chen X Z, Higo T, Tanaka K, Nomoto T, Tsai H S, Idzuchi H, Shiga M, Sakamoto S, Ando R, Kosaki H, Matsuo T, Nishio-Hamane D, Arita R, Miwa S, Nakatsuji S 2023 *Nature* **613** 490
- [36] Liu X H, Feng Q, Zhang D, Deng Y C, Dong S, Zhang E Z, Li W, Lu Q, Chang K, Wang K Y 2023 *Adv. Mater.* **35** 2211634
- [37] Kim K, Seo J, Lee E, Ko K T, Kim B S, Jang B G, Ok J M, Lee J, Jo Y J, Kang W, Shim J H, Kim C, Yeom H W, Min B I, Yang B J, Kim J S 2018 *Nat. Mater.* **17** 794
- [38] Deng Y J, Yu Y J, Song Y C, Zhang J Z, Wang N Z, Sun Z Y, Yi Y F, Wu Y Z, Wu S W, Zhu J Y, Wang J, Chen X H, Zhang Y B 2018 *Nature* **563** 94
- [39] Wang X, Tang J, Xia X X, et al. 2019 *Sci. Adv.* **5** eaaw8904
- [40] Zhang G J, Guo F, Wu H, Wen X K, Yang L, Jin W, Zhang W F, Chang H X 2022 *Nat. Commun.* **13** 5067
- [41] Zhu W K, Xie S H, Lin H L, Zhang G J, Wu H, Hu T G, Wang Z A, Zhang X M, Xu J H, Wang Y J, Zheng Y H, Yan F G, Zhang J, Zhao L X, Patané A, Zhang J, Chang H X, Wang K Y 2022 *Chin. Phys. Lett.* **39** 128501
- [42] Wang P Y, Ge J, Li J H, Liu Y Z, Xu Y, Wang J 2021 *The Innovation* **2** 100098
- [43] Muechler L, Liu E K, Gayles J, Xu Q N, Felser C, Sun Y 2020 *Phys. Rev. B* **101** 115106
- [44] Howard S, Jiao L, Wang Z Y, Morali N, Batabyal R, Kumar-Nag P, Avraham N, Beidenkopf H, Vir P, Liu E K, Shekhar C, Felser C, Hughes T, Madhavan V 2021 *Nat. Commun.* **12** 4269
- [45] Araki Y, Nomura K 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 014007
- [46] Kobayashi K, Ominato Y, Nomura K 2018 *J Phys Soc Jpn* **87** 073707
- [47] Gaudet J, Yang H Y, Baidya S, Lu B Z, Xu G Y, Zhao Y, Rodriguez-Rivera J A, Hoffmann C M, Graf D E, Torchinsky D H, Nikolic P, Vanderbilt D, Tafti F, Broholm C L 2021 *Nat. Mater.* **20** 1650
- [48] Kurebayashi D, Nomura K 2019 *Sci. Rep.* **9** 5365
- [49] Kurebayashi D, Araki Y, Nomura K 2021 *J Phys Soc Jpn* **90** 084702
- [50] Wang Q Y, Zeng Y, Yuan K, Zeng Q Q, Gu P F, Xu X L, Wang H W, Han Z, Nomura K, Wang W H, Liu E K, Hou Y L, Ye Y 2022 *Nat. Electron.* **6** 119
- [51] Araki Y, Ieda J 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 277205
- [52] Yamanouchi M, Araki Y, Sakai T, Uemura T, Ohata H, Ieda J 2022 *Sci. Adv.* **8** eabl6192

SPECIAL TOPIC—Two-dimensional magnetism and topological spin physics

Coupling between magnetism and topology: From fundamental physics to topological magneto-electronics*

Liu En-Ke[†]*(State Key Laboratory for Magnetism, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)*

(Received 26 October 2023; revised manuscript received 23 December 2023)

Abstract

Magnetism and topological physics are both well-developed disciplines, and their combination is a demand and foundation for the development of next-generation magneto-electronics. Magnetic topological materials are important products of coupling between magnetic order and topological physics, providing material carrier and regulatory degrees of freedom for novel topological physics. Magnetic Weyl semimetals realize Weyl fermion states under time-reversal symmetry breaking, leading to a host of novel magnetic, electric, thermal, and optical effects through enhanced Berry curvature originating from topology. The interaction between Weyl electrons and magnetic order also establishes topological electronic physics as a new principle and driving force for magneto-electronic applications. At present, the primary task and characteristic of the first development stage of magnetic topological materials is to discover new states and effects, while the understanding of interaction between topologically nontrivial electrons in momentum space and magnetic order in real space has received attention of researchers. The comprehensive advances of these two stages will accumulate the physical foundation and application explorations for topological magneto-electronics. This paper focuses on the two development stages of magnetic topological materials and discusses three aspects: (i) proposal and realization of strategy for magnetic topological materials; (ii) exploration of electronic states with nontrivial topology under uniform magnetic order and their associated novel physical properties; (iii) the interaction between localized magnetic states and topological electrons. It provides an in-depth discussion on current hot topics and development trends in the field, and future development in topological magneto-electronics, thereby assisting in the future development of topological spin quantum devices.

Keywords: topological physics, magnetic Weyl semimetals, topological magneto-electronics**PACS:** 71.55.Ak, 75.47.-m, 72.25.Ba, 72.80.-r**DOI:** [10.7498/aps.73.20231711](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231711)

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2022YFA1403800, 2019YFA0704900), the Fundamental Science Center of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52088101), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11974394), the Strategic Priority Research Program (B) of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. XDB33000000), and the Synergetic Extreme Condition User Facility (SECUF) of the Chinese Academy of Sciences, China.

[†] Corresponding author. E-mail: ekliu@iphy.ac.cn

磁序与拓扑的耦合：从基础物理到拓扑磁电子学

刘恩克

Coupling between magnetism and topology: From fundamental physics to topological magneto-electronics

Liu En-Ke

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 017103 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231711

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231711>

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

磁性斯格明子的研究现状和展望

Overview and outlook of magnetic skyrmions

物理学报. 2018, 67(13): 131201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180619>

拓扑半金属材料角分辨光电子能谱研究进展

Progress of ARPES study on topological semimetals

物理学报. 2019, 68(22): 227102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191544>

拓扑半金属的红外光谱研究

Optical properties of topological semimetals

物理学报. 2019, 68(22): 227804 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191510>

拓扑半金属材料的单晶生长研究进展

Research progress of single crystal growth for topological semimetals

物理学报. 2018, 67(12): 128102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180796>

强三维拓扑绝缘体与磁性拓扑绝缘体的角分辨光电子能谱学研究进展

Angle resolved photoemission spectroscopy studies on three dimensional strong topological insulators and magnetic topological insulators

物理学报. 2019, 68(22): 227901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191450>

层状磁性拓扑材料中的物理问题与实验进展

Physical problems and experimental progress in layered magnetic topological materials

物理学报. 2021, 70(12): 127302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210133>