

· 科学论坛 ·

## 二维及拓扑自旋物理<sup>\*</sup>

袁喆<sup>1</sup> 于国强<sup>2</sup> 韩伟<sup>3</sup> 王守国<sup>4</sup> 王开友<sup>5</sup>  
 吴义政<sup>6</sup> 夏钊<sup>7</sup> 姜向伟<sup>8</sup> 倪培根<sup>8\*\*</sup>

1. 复旦大学微纳电子器件与量子计算机研究院, 上海 200433
2. 中国科学院物理研究所, 北京 100190
3. 北京大学物理学院, 北京 100871
4. 安徽大学材料科学与工程学院, 合肥 230601
5. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083
6. 复旦大学物理系, 上海 200433
7. 东南大学物理学院, 南京 210096
8. 国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085

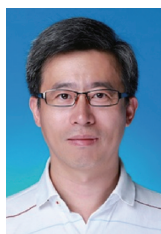
**[摘要]** 第309期双清论坛“二维及拓扑自旋物理”总结了我国二维磁性和实空间拓扑自旋物态的相关研究进展,分析了进一步发展所面临的机遇与挑战,梳理了寻找高磁有序温度的新材料体系、拓扑及手性自旋物理、新颖拓扑磁结构的发现与表征技术等一系列未来主要研究方向,并探讨了科学基金资助模式与策略。论坛凝练出了二维及拓扑自旋物理研究领域未来5~10年的重大关键科学问题,主要包括:(1)二维磁性材料及其异质结构的物性研究;(2)拓扑磁学与自旋物理研究;(3)高分辨拓扑磁结构表征与多场调控研究;(4)低维自旋材料、物理与器件原理研究等。论坛基于二维及拓扑自旋物理研究领域的现状分析和未来展望,提出了进一步发展的建议。

**[关键词]** 二维磁性;拓扑磁性;自旋电子学;拓扑磁结构表征

2022年7月31日至8月2日,国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)数学物理学部、工程与材料科学部、信息科学部、计划与政策局共同主办了主题为“二维及拓扑自旋物理”的第309期双清论坛,来自国内高校和科研院所的40余位专家学者应邀参加了此次论坛。论坛详细探讨和梳理了二维磁性及拓扑自旋物态等自旋物理新兴领域的发展现状、趋势与挑战,总结了我国的研究基础与优势,凝练出了这一领域的关键科学问题,并提出了国家自然科学基金资助策略建议。

### 1 二维及拓扑自旋物理研究的战略意义

二维及拓扑自旋物理是磁学和自旋电子学研究的前沿领域,对其深入研究不仅可以极大地丰富磁



**倪培根** 博士,研究员,国家自然科学基金委员会数理科学部综合与战略规划处处长。



**袁喆** 博士,复旦大学微纳电子器件与量子计算机研究院教授。主要从事自旋输运的理论及第一性原理计算、自旋类脑计算等方面研究。

学和自旋电子学物理原理,也为研制新原理自旋信息器件提供理想的研究平台。自石墨烯等非磁性二

收稿日期:2022-12-24;修回日期:2023-06-14

\* 本文根据第309期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email: nipg@nsfc.gov.cn

范德华材料被研究以来,二维磁性材料的探索就一直备受关注。Mermin-Wagner 定理<sup>[1]</sup>表明二维各向同性海森堡模型在有限温度不会产生自发磁化,而磁各向异性的存在可以突破这个限制,成为实现二维磁有序的关键因素。二维磁性材料中,对称性的降低会增强材料固有的磁晶各向异性,使得磁有序甚至能够在单原子层极限厚度下稳定。国际上二维磁性材料相关的研究始于 2016 年,随后便得到迅速发展,实现了居里温度的电学调控,测量得到了巨大的隧穿磁电阻效应,实现了激光调控磁性,发现了拓扑自旋物态等新奇物理现象<sup>[2-4]</sup>。

拓扑自旋物理结合了近年来的两大物理学前沿领域——拓扑物理和自旋电子学,不仅对揭示和理解拓扑和自旋相关的物理规律方面有重要的科学意义,更在新型低能耗信息器件方面有良好的应用前景。拓扑自旋物理的内涵主要包括实空间拓扑磁构型和拓扑自旋波等方面,相关研究近年来也得到了快速发展,实现了磁斯格明子等实空间拓扑自旋物态的电学方式产生、操控和读取、原理型器件制备等多项重要进展,发现了非互易输运、拓扑保护的边界态等自旋波拓扑能带相关的丰富物理现象。

由于历史原因,我国在传统的以半导体为基础的电子学领域与国际领先水平差距较大。但在新兴的二维及拓扑自旋物理方面,我国与其他发达国家处于同一起跑线,是实现超越的好机会。目前,二维磁性及拓扑自旋物态研究在材料、表征、调控、器件原理等方面还存在着巨大挑战,主要包括:二维磁性材料异质结的构建,以及其电子和自旋结构的原子级表征和自旋动力学的超快调控;新奇拓扑磁结构的精确表征、重构与电学精准调控;基于二维磁性及拓扑自旋的器件设计和全电控工作原理;新自旋物态的探索等。进一步加强二维磁性及拓扑自旋物理相关的前瞻性研究,发展独特的探测表征技术,将推动我国在相关研究领域的快速发展。

## 2 二维及拓扑自旋物理的发展现状、趋势与挑战

### 2.1 二维磁性范德华材料的发现

二维磁性范德华材料的报道最早开始于 2016 年,多个课题组通过机械剥离法得到单层和少层的  $\text{NiPS}_3$ 、 $\text{FePS}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$  等样品<sup>[5-7]</sup>,并通过拉曼测量间接证明了材料中的长程磁有序。二维铁磁材料研究的突破是在 2017 年,张翔研究组和许晓栋研究组分别报道了机械剥离的  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  和  $\text{CrI}_3$  层

状范德华材料中观察到长程磁有序。这两种材料都是铁磁绝缘体,均表现出明显的磁性特征<sup>[8, 9]</sup>。上述两个工作的报道,引发了原子级厚度的二维磁性材料的研究热潮,尤其集中在对磁性范德华块材的剥离和磁性表征等方面。

二维范德华材料中的磁特性对于层数具有较强依赖性。 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  具有较弱的磁各向异性,接近理想的二维海森堡铁磁材料,块体的居里温度约为 65 K。随着样品厚度的减少,热涨落会强烈抑制磁性转变温度。实验测量结果显示,双层  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  样品的居里温度约为 30 K,而单层  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  材料中磁性甚至会消失。对于具有强自旋轨道耦合等导致具有较强磁各向异性的材料,例如铁磁绝缘体  $\text{CrI}_3$  和铁磁金属  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ ,磁性均可以稳定存在于单层样品中。 $\text{CrI}_3$  是一种二维伊辛反铁磁材料,自旋磁矩取向垂直于材料的二维平面,其磁各向异性主要来源于近  $90^\circ$  的 Cr-I-Cr 键中各向异性的铁磁超交换相互作用,以及 Cr 的单离子各向异性<sup>[10]</sup>。 $\text{CrI}_3$  的磁性也具有层数依赖关系,块材的铁磁转变温度为 61 K,而单层铁磁转变温度略低,约为 45 K,说明该材料层间存在较弱的磁耦合作用。研究发现, $\text{CrI}_3$  层内表现为铁磁性,而层间则表现为反铁磁性,即单层  $\text{CrI}_3$  具有铁磁性,双层  $\text{CrI}_3$  具有反铁磁性,三层  $\text{CrI}_3$  的层间耦合仍然是铁磁性,并且其剩余磁化强度和饱和磁化强度比单层样品大一个量级,这可能由层数有关的电子结构变化造成的。此外,实验表明衬底对  $\text{CrI}_3$  样品的作用可以忽略,因此可以将机械剥离的  $\text{CrI}_3$  样品当作独立的单晶,而传统金属铁磁薄膜与衬底具有非常强的相互作用。 $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  是一种铁磁金属,使用分子束外延和化学气相传输法生长的样品中载流子浓度分别达到  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  和  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  的量级<sup>[11, 12]</sup>。磁光克尔和反常霍尔效应都表明  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  薄膜样品具有层间铁磁耦合作用。

二维磁性材料的制备有多种方法,如单晶块状材料生长与机械剥离相结合获得原子层级薄片,分子束外延、化学气相沉积等。采用机械剥离法利用层与层之间的弱范德华力分离出二维磁性材料<sup>[8]</sup>。Fei 等人<sup>[13]</sup>采用金辅助机械剥离法获得更薄更大的  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  晶体。Deng 等人<sup>[14]</sup>进一步发展了该方法,用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  替代金,成功得到了单层  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ 。然而,传统的机械剥离方法很难获得大面积薄层二维磁性材料,这限制了二维磁性材料的应用。为了寻求大面积生长方式,用分子束外延和化学气相沉

积来制备二维磁性材料。例如,利用分子束外延可以合成单层  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  和  $\text{Cr}_2\text{Te}_3$ <sup>[11, 15, 16]</sup>,通过化学气相沉积法可用来合成  $\text{Cr}_2\text{Te}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{S}_3$  等材料<sup>[17, 18]</sup>。

二维磁性材料相关研究迅速扩展到其他材料体系。与  $\text{CrI}_3$  同结构类型的  $\text{CrBr}_3$ 、 $\text{CrCl}_3$ ,其块体磁性早期研究已有报道。 $\text{CrBr}_3$  的磁性与  $\text{CrI}_3$  类似,表现为面外磁各向异性,层间为反铁磁耦合,居里温度为 31 K<sup>[19]</sup>,而  $\text{CrCl}_3$  表现为面内磁各向异性,层间为反铁磁耦合,奈尔温度为 16 K<sup>[20]</sup>。此外,其它典型二维磁性材料还包括  $\text{Cr}_2\text{X}_2\text{Te}_6$  ( $\text{X} = \text{Si}, \text{Ge}, \text{Sn}$ )<sup>[8, 21, 22]</sup>,  $1\text{T-CrX}_2$  ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ )<sup>[23-27]</sup>,  $\text{MX}_2$  ( $\text{M} = \text{Mn}, \text{V}; \text{X} = \text{Se}, \text{Te}$ )<sup>[28-31]</sup>。二维磁性材料中还存在  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  等磁性拓扑绝缘体<sup>[32, 33]</sup>,由于存在自发的时间反演对称性破缺,该类材料体系是研究量子反常霍尔效应和各种拓扑现象的理想对象。实验研究表明, $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  是一种层间反铁磁拓扑绝缘体,随着样品减薄到原子层厚度且为奇数层时,表现为铁磁性。磁性拓扑绝缘体中蕴含着丰富的拓扑自旋物理现象,由于具有较强的自旋轨道耦合和动量-自旋锁定的拓扑保护电子态,其与磁性材料的界面耦合可能产生多种新奇的性质,如巨大的自旋轨道矩可以高效地操控磁体的磁矩取向等。

## 2.2 二维及拓扑自旋物理的重要科学意义与研究现状

### 2.2.1 二维磁性调控

二维磁性的研究重点之一是通过光、电、应力、堆垛、转角、静电掺杂和近邻效应等多种手段调控材料物性<sup>[2]</sup>,其中堆垛、转角、静电掺杂等手段是二维磁性材料特有的方式。在  $\text{CrI}_3$ -石墨烯垂直异质结中,静电掺杂能够对单层和双层  $\text{CrI}_3$  的磁性具有显著调控作用。空穴和电子掺杂分别增强和减弱单层样品的磁性,且静电掺杂可以有效调控单层  $\text{CrI}_3$  的饱和磁化强度、矫顽力和居里温度。电子掺杂能够诱导双层  $\text{CrI}_3$  样品发生反铁磁到铁磁耦合的转变<sup>[34]</sup>,从反铁磁排列到铁磁排列的转变磁场可以有效地被静电掺杂调控(高达 30%左右)<sup>[35]</sup>。此外,研究发现在双层  $\text{CrI}_3$  上施加垂直电场,会使其在零磁场附近产生一个磁光克尔回滞信号,并且克尔角与电场强度呈线性关系,表明在双层  $\text{CrI}_3$  中存在着较强的磁电效应,可以实现外加电场对样品磁性的调控<sup>[36]</sup>。张远波研究组通过  $\text{Al}_2\text{O}_3$  辅助剥离的方法获得了薄层的  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  样品,并利用  $\text{LiClO}_4$  离子栅压电场实现了对薄层样品居里温度和矫顽场的有

效调控,反常霍尔测量表明,正向栅压的施加可以将三层  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  样品中的居里温度由 100 K 调控到 300 K<sup>[14]</sup>。三维铁磁与二维  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  的层间铁磁耦合,使得  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  在室温下具有良好垂直磁各向异性<sup>[37]</sup>。在分子束外延制备的双层  $\text{CrBr}_3$  薄膜中,研究人员利用自旋极化扫描隧道显微镜研究发现层间堆垛可以有效调控层间的铁磁或反铁磁耦合<sup>[38]</sup>。应力调控二维磁性的一个典型例子是在块体  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  样品中,施加压强为 1 GPa 的液压可以将居里温度降低 9%左右<sup>[39]</sup>,而超过 1 GPa 的压强会引起磁性由面外向面内的自旋转向相变<sup>[40]</sup>。

通过自旋极化电流对磁性材料的磁矩进行调控是一种超快、高效率、非易失性控制磁矩的方式,相应的器件设计已经或者将应用于下一代的磁随机存储器中。对于低维的磁性材料而言,通过这种方式来对磁矩进行调控也取得了多项重要进展。中国科学院物理研究所和加州大学河滨分校两个研究团队最早分别实现了自旋轨道力矩翻转  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  的磁矩<sup>[41, 42]</sup>,随后该调控方法被成功应用于铁磁性半导体  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ <sup>[43, 44]</sup>和反铁磁性金属  $\text{Fe}_{1/3}\text{NbS}_2$ ,并且实现了超低的临界翻转电流密度( $\sim 2.7 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ )<sup>[45]</sup>,也被应用于反铁磁性拓扑绝缘体  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ,以及具有量子反常霍尔效应的转角双层石墨烯中<sup>[46, 47]</sup>。此外,姚望等预言了双层膜  $\text{CrI}_3$  量子阱结构中巨大的自旋转移矩效应,目前该效应还有待实验证实。上述利用电流所携带的自旋角动量来操控磁矩的方案在磁性二维材料领域里很可能具有普适性,如何结合二维磁性材料自身的优势(例如易受电场、应力及界面、近邻影响等)进一步实现零磁场翻转<sup>[48]</sup>以及提高翻转效率是下一阶段的重要研究内容。值得一提的是,最近张翔研究组等利用特殊能量的圆偏振光的自旋角动量实现了对原子级薄层  $\text{CrI}_3$  的全光学翻转<sup>[49]</sup>。

针对二维磁性材料构建的全二维异质结构相关的研究也取得了诸多进展。利用石墨烯作为电极的  $\text{CrI}_3$  磁隧道结中,人们观察到了超过 10000%的磁阻<sup>[50-52]</sup>。在  $\text{CrI}_3/\text{WSe}_2$  异质结中,低温下光谱显示零场  $\text{WSe}_2$  的激子振荡存在塞曼劈裂,而在温度高于  $\text{CrI}_3$  居里温度时消失,表明该效应是由界面交换作用引起的<sup>[53]</sup>。 $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  作为一种二维铁磁金属层状材料,可以作为铁磁电极与二维绝缘体或者半导体形成磁隧穿结,如  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2/\text{hBN}/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ <sup>[54]</sup>和  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2/\text{石墨烯}/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ <sup>[55]</sup>以及  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2/\text{InSe}/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ <sup>[56]</sup>异质结构等。最近

华中科技大学常海欣研究组发现了居里温度高于室温,为 380 K 的  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  磁性金属<sup>[57]</sup>,基于此,首次实现了室温下全二维磁电阻效应为 85% 的铁磁/半导体异质结<sup>[58]</sup>。

### 2.2.2 拓扑磁结构及其动力学

拓扑磁构型的研究主要集中在磁性序参量的实空间分布,常见的有磁畴壁、霍普夫子、斯格明子等。由于磁性序参量遵循较为复杂的非线性动力学,拓扑磁构型展示出丰富新奇的稳态特性和动力学特性以及广阔的应用前景。斯格明子是一种特殊的非共线磁涡旋结构,具有非平庸的拓扑保护属性,因此斯格明子在实空间中能够稳定并具有一定的抗干扰能力。斯格明子自 2009 年被发现开始<sup>[59]</sup>,就被认为在构建未来高密度、高速度、低能耗自旋电子学器件方面具有很好的应用前景<sup>[60]</sup>。以斯格明子为代表的新型纳米磁结构展现出来的优异特性迅速引起了全世界科研机构和高科技企业的高度重视,同时各科技强国也立即组织了科研攻关团队,并尝试以斯格明子为基本的逻辑或者存储单元构建自旋电子学器件。目前,关于斯格明子的研究主要集中在两类材料体系。第一类是具有非中心对称结构的块体材料,其中包括具有 B20 结构  $\text{MnSi}$ 、 $\text{MnGe}$ 、 $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ 、 $\text{FeGe}$ 、 $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$ 、 $\beta\text{-Mn}$  结构的  $\text{Co-Zn-Mn}$  合金等。根据材料的对称性,可进一步分为布洛赫型、奈尔型、混合型等,而反铁磁材料中也存在反铁磁斯格明子<sup>[61]</sup>。该类材料中斯格明子具有均匀的尺寸,多个斯格明子可以形成完美晶格。斯格明子尺寸小、电流易操控都是在此类材料中表现出来的。此类材料中的斯格明子可被电流有效操控,实验上已经实现了纳米条带存储器件结构单元中电流诱导磁斯格明子的写入、删除及寻址一体化精准操控,为构筑拓扑磁性存储器提供了原理性支撑<sup>[62]</sup>。第二类材料重金属/铁磁金属薄膜异质结被发现后,室温稳定的斯格明子开始走进人们的视线并引起广泛关注<sup>[63]</sup>。在多层膜体系中,通过调节材料成分、厚度以及制备条件,可以控制斯格明子的大小,使其尺寸最小达到纳米量级<sup>[64]</sup>。一般来说,在非受限体系中斯格明子均需要施加外磁场才能稳定。最近研究发现,在具有交换偏置多层薄膜的体系中,室温条件下可以实现零外场稳定存在的斯格明子,并且实现对产生斯格明子的数量及图案进行调控<sup>[65]</sup>。

斯格明子的一个优势在于较低电流密度驱动下也可以有较快的运动速度,通过将斯格明子的有无

视为存储的“0”和“1”基本单元,有望构建以斯格明子为信息载体的高密度、高速度、低功耗的器件,如新型赛道存储器<sup>[66]</sup>。此外,斯格明子器件也可以实现微波振荡器件、逻辑运算、类神经计算等等。为了实现这类器件,除了解决斯格明子材料、电流调控等问题外,如何对小尺寸的斯格明子实现电学读取也是关键。将高质量的磁性隧道结与斯格明子材料结合,利用磁耦合相互作用把斯格明子耦合进入磁性隧道结,并利用高隧穿磁电阻效应读取有可能成为解决方案之一<sup>[67]</sup>。虽然目前已经取得了很多突破性的进展,但大多数基于斯格明子的器件仍处于概念化、模型化和原理型器开发阶段,相信随着对斯格明子的深入研究,基于斯格明子的应用可能会逐渐走向成熟。

除了斯格明子外,其它拓扑磁构型也得到了广泛的研究。例如,戴荣身等预言了三维拓扑磁孤子——霍普夫子<sup>[68]</sup>。王宪思等<sup>[69]</sup>、臧家栋等<sup>[70]</sup>研究了霍普夫子动力学,发现其在不变形的情况下几乎没有横向移动,在变形的情况下则有更加丰富的动力学。实验研究方面,Kent 等<sup>[71]</sup>发现了磁纳米盘中存在霍普夫子的迹象。

### 2.2.3 自旋波的拓扑与量子态

自旋波是磁性系统中的集体激发,也包含了丰富的拓扑自旋物理现象。自旋波能带的贝里曲率可能呈现丰富的拓扑结构,而这些拓扑结构又会通过体一边界对应关系体现在可测量的输运性质上。拓扑保护的自旋波边界态表现出优异的输运性质,可以免疫多种缺陷的散射,从而作为新型信息器件的载体。日本京都大学的 Fujimoto<sup>[72]</sup>最早在磁性系统中引入了自旋波霍尔效应,由于非零的贝里相位的调控,随空间变化的磁场能够驱动磁振子运动,类比于电场驱动电子(或空穴)运动。Katsura 等<sup>[73]</sup>更加明确地研究了磁振子能带并且提出了实验中可能实现的系统,在三角晶格和 kagome 晶格中,存在由磁振子霍尔效应引起的热霍尔效应。Onose 等<sup>[74]</sup>在一种焦绿石结构的材料中通过热测量揭示了由 DM(Dzyaloshinsky-Moriya)相互作用引起的磁振子霍尔效应。沿着上述磁振子霍尔效应的工作,二维“拓扑磁振子绝缘体”的概念分别被几个研究组提出<sup>[75-77]</sup>。Shindou 等<sup>[78]</sup>考虑了一种复杂的人工周期性铁磁纳米片团簇,团簇再以周期性排列,发现其中存在拓扑不平凡的手性边界态。Chisnel 等<sup>[79]</sup>首次在 Kagome 晶格的  $\text{Cu-[1,3 苯二甲酸二甲酯]}$  中观察到二维拓扑自旋波态,为之前的诸多理论提供了

有力的实验验证。Owerre 研究了铁磁性蜂巢晶格,发现存在次近邻 DM 相互作用并满足一定条件时,系统存在拓扑保护的边界态以及磁振子霍尔效应<sup>[80]</sup>。随后, Kim 等基于旋量图像,在引入随机无序性情况下研究了类似系统中的磁振子输运<sup>[81]</sup>。Cheng 等<sup>[82]</sup>基于量子力学模型以及准经典波包运动模型,研究了存在次近邻 DM 相互作用的反铁磁蜂巢晶格中的磁振子霍尔效应。王宪思等<sup>[83-85]</sup>发现铁磁二维蜂巢结构若存在赝偶极相互作用,则会存在拓扑非平凡的磁振子能带和拓扑保护边界态,进一步研究了无序性在拓扑磁振子系统中的作用,定义了实空间的玻色子拓扑示性数,并数值验证了二维中的体—边界对应。李志雄等<sup>[86, 87]</sup>研究了多种人工磁结构中的拓扑激发,并类比高阶拓扑绝缘体研究了磁构型的高阶拓扑态。

自旋波量子即磁子的叠加性和纠缠性可以和量子信息科学相结合,用于信息的编码和计算<sup>[88]</sup>。近年来,用于量子信息处理的高品质量子比特和腔光子研究取得了重要突破<sup>[89-93]</sup>,为磁振子与量子系统的融合与集成提供了理想的物理平台。量子磁子学作为磁子学与量子信息科学交叉的一门新兴学科,旨在探究磁子量子态以及磁子系统与其它量子系统的耦合与协同工作<sup>[94, 95]</sup>。磁子量子态包括单磁子态<sup>[96]</sup>、压缩态<sup>[97]</sup>、薛定谔猫态<sup>[98]</sup>等,广义来说,磁子的宏观量子态,如自旋超流态、玻色—爱因斯坦凝聚态也属于量子磁子学的研究范畴。进一步来讲,目前发展比较成熟的量子平台如超导比特、NV 色心、光学谐振腔、声学模式等已经能够和磁子系统进行耦合并实现信息的交互处理。磁光复合系统的宇称时间联合对称性破缺时,磁子和光子可以在粒子数空间形成一个稳定的贝尔态。这个贝尔态对环境和噪声都有较强的鲁棒性,为磁光纠缠在量子信息里的应用奠定了基础<sup>[99]</sup>。只有阐明二维磁体及异质结中磁子的输运性质,揭示磁子与拓扑磁孤子、磁子—磁子、以及磁子与其他准粒子(如光子、声子等)之间的耦合作用等新奇物态及其量子特性,才有可能设计和研制出基于二维磁性材料的磁子器件。

### 2.3 主要探测方法与调控手段

二维磁性材料实验探测的主要挑战在于实现原子层厚度依赖的物性测量(磁性范德华块体材料与传统三维磁性材料探测手段原则上一样,不在此赘述)。目前主要的探测方法可分为光学、电学及谱学手段。原子级厚度二维磁性材料中本征磁性长程序的最早实验证据就是来自极化拉曼和磁光克尔效应

以及磁圆二色性反射实验。此外,极化光致发光及二次谐波非线性光学响应也被用来研究不同原子层厚度及外加磁场下的二维磁性材料的能带及对称性变化。在电学测量中,反常霍尔效应、反常能斯特效应及各向异性磁电阻等可以比较方便地用于探测原子级厚度的金属磁性二维材料的磁矩方向及其动量空间中贝里曲率大小,而自旋塞贝克效应、自旋能斯特效应以及热霍尔效应可以用于研究二维磁性材料的磁子—声子耦合。基于二维磁性材料异质结的隧穿磁电阻、微分电导、二阶微分电导等测量手段也可以用来探测二维磁性电极的自旋极化率和磁性隧穿层的自旋过滤效应、磁子谱等信息。相比于光学手段,电学测试通常需要二维材料转移及微加工技术的辅助以得到高质量的二维材料纳米器件。谱学测试手段包括自旋分辨的扫描隧道谱、角分辨光电子能谱等,这些手段能对实空间的磁构型以及动量空间自旋依赖的能带色散关系进行高精度的表征,但是对样品有较苛刻的要求(通常需要外延生长高质量、大面积的单晶薄膜)。纳米尺寸的实空间磁结构表征主要依赖于洛伦茨透射电镜、磁力显微镜、金刚石色心探测等等实验技术,而布里渊光散射与金刚石色心也能用来对磁性材料中的自旋波进行成像。以上各类实验技术如果具有超快时间分辨的功能,则可以研究磁性二维材料中自旋相关的动力学过程。

二维材料的主要调控手段也与它们原子级的厚度、平整度、较弱的层间范德华结合力密切相关。相比于传统磁性材料,二维磁性材料不受特定衬底的束缚,若干原子层的磁性二维材料可能更容易受到掺杂、外加电场、光照、应力和近邻体系的影响进而调控其磁性。例如离子液体掺杂能把  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  和  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  的  $T_C$  分别从 220 K 和  $\sim 65$  K 提高到 300 K 以及 200 K<sup>[14, 100]</sup>,  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  中替换 Fe 原子为 Co 或 Ni 原子可能得到室温斯格明子晶格或者 A-型反铁磁性体系<sup>[101, 102]</sup>。应力或者静压力也能显著提高  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  和  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  的铁磁性转变温度<sup>[103, 104]</sup>,单轴应力可以旋转  $\text{MnPSe}_3$  的奈尔矢方向<sup>[105]</sup>。此外,二维磁性材料特有的调控手段还包括可以与各种不同物性的其他二维材料(例如,强自旋轨道耦合材料、半导体发光材料、铁电、超导、拓扑材料、关联材料等)以“搭积木”的方式堆叠构筑新型异质结体系以及特殊的不同磁性二维材料层间转角体系。这是传统材料几乎无法实现的一个优势,相关的研究在实验上的报道还很少。

## 2.4 我国二维及拓扑自旋物理研究基础与优势

我国在二维及拓扑自旋物理方面已经开始开展了大量的研究,并取得了一系列重要研究进展。除了前文中已经提到的相关突破性成果,复旦大学高春雷教授组直接观察测到二维材料中堆垛形式依赖的层间磁性<sup>[38]</sup>;复旦大学肖江教授与香港大学姚望教授课题组合作从理论上研究了二维磁性材料中的莫尔图案和斯格明子<sup>[106]</sup>;南京大学徐永兵教授团队发展了时间分辨和自旋分辨的光电子能谱平台,在 $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ 等二维材料中实现了全光学超快磁调控<sup>[107-109]</sup>;北京理工大学姚裕贵教授团队实现了具有面内反常霍尔效应的异维超结构磁性材料等<sup>[110]</sup>;中国科学院物理研究所王文洪研究员团队在二维磁性材料 $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ 中首次观察到布洛赫型磁性斯格明子自旋结构<sup>[111]</sup>,张颖研究员团队在 $\text{Fe}_{5-x}\text{GeTe}_2$ 材料中发现了(反)磁麦韧链<sup>[112]</sup>。

科学研究的发展与突破需要科研人才的培养和积累,我国的磁学领域研究经过数代人的不懈努力形成了很好的传承。近年来,得益于国家对磁学研究的大力支持,随着 20 世纪 90 年代末开始的各类人才项目的推出,引进了大量年富力强的青年科研人才,进一步完善了磁学的学科布局。目前磁学研究的重要平台和大科学装置包括中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室、兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室、山西师范大学磁性分子与磁信息材料教育部重点实验室、中国科学院强磁场科学中心、国家脉冲强磁场科学中心、中国散裂中子源和中国科学院磁性材料与器件重点实验室等。中国科学院(物理研究所、半导体研究所、强磁场科学中心等)、北京大学、清华大学、南京大学、复旦大学、北京航空航天大学等学术机构都已经围绕二维磁性及拓扑自旋物理方面开展了大量的研究工作,取得了一定的成绩与积累。在理论研究方面,国内有一批青年研究人员分布于各高校和研究所。这些研究平台与人才队伍为二维及拓扑自旋物理方面的研究提供了良好的基础。

## 3 二维及拓扑自旋物理的关键科学问题

### 3.1 二维磁性材料

二维磁性材料的关键科学问题之一是寻找高磁有序温度的二维磁性新材料体系及磁性调控。尽管已有大量二维磁性范德华材料在实验上被发现或通过理论计算被预言,然而与传统三维磁性材料中磁有序温度由交换相互作用决定不同,二维磁性材料

中磁有序温度受磁各向异性能和自旋波的调控,导致其居里温度或奈尔温度大多低于室温,这大大限制了其未来应用。因此,寻找具有更高磁有序温度的二维磁性材料、实现均匀大面积的二维范德华磁性单晶材料的生长,以及利用各种调控手段提高磁有序温度是极为关键的科学问题,这也是研制高质量二维自旋电子学器件的基础。在理论研究方面,准确描述范德华相互作用是第一性原理计算层间磁耦合与磁构型相关电子结构的关键因素,也是精确预言二维磁性材料中自旋相关运输的基础。二维磁性材料研究中的关键科学问题还包括材料体系中的磁、光、电耦合机制。二维材料可以通过门电压、电流、近邻效应、高压、应力、化学修饰、光激发和转角堆叠等多种方式进行调控,利用光学、电磁运输、及磁性测量来深入研究二维材料及其异质结中的磁、光、电耦合机制,以及其在外场作用下演化规律。其中,利用电流高效的调控二维磁性材料的磁矩是器件应用相关的重要科学问题。基于高效的电学调控,有望设计并实现新型原理型器件,推动二维磁性材料在自旋电子器件中的应用。

### 3.2 异质结构

二维磁性材料将推动铁磁与超导、半导体、铁电等形成具有理想界面的异质结构,为新物理效应的发现和研究提供良好的平台。例如铁磁/超导异质结中的铁磁性及超导电性相互作用催生出许多新奇的物理现象<sup>[113, 114]</sup>,包括自旋三重态超导,拓扑超导以及超导序参量振荡等,这对基于其构建功能化器件和基础物理研究都具有重要的意义。超导准粒子电荷—自旋分离特性<sup>[115]</sup>以及具有拓扑保护的超导涡旋<sup>[116]</sup>使得其作为长相干时间、长距离传输的自旋流载体。更为重要的是,在铁磁/超导界面构建自旋三重态库珀对可以作为无耗散自旋流载体<sup>[114]</sup>。早期研究通过界面非共线磁化结构实现自旋三重态库珀对转化,这对界面精准调控提出较高要求<sup>[117, 118]</sup>。近年来,一些理论和实验工作指出通过铁磁/超导界面自旋轨道耦合效应可以高效构建自旋三重态超导<sup>[119, 120]</sup>。基于自旋轨道耦合效应在铁磁/界面构建拓扑超导也受到广泛关注,对实现拓扑量子计算具有积极推动作用<sup>[121, 122]</sup>。另外,铁磁/超导异质结中序参量振荡导致的 $0-\pi$ 相位转变在构建快速单磁通量子器件<sup>[123, 124]</sup>, $\pi$ -qubit<sup>[125]</sup>以及自旋流动力学调制<sup>[126]</sup>等方面具有潜在应用价值。随着相关核心科研问题的解决,铁磁/超导异质结将在超导自旋电子学乃至量子计算方面的基础物理研究和前沿应用发

挥重要作用。

### 3.3 拓扑磁学与自旋物理研究

拓扑磁学的研究范畴囊括了拓扑磁性材料的优化、自旋拓扑物理、拓扑磁结构的操控、探测以及功能器件的开发<sup>[127]</sup>。关键科学问题聚焦在:(1) 如何开发高效能的拓扑磁性材料;(2) 如何揭示更丰富的拓扑物理;(3) 如何实现拓扑磁结构的确定性操控和探测,并进一步演示拓扑自旋功能器件。在高效能的斯格明子拓扑新材料方面,需要结合第一性原理计算的理论指导,为斯格明子材料优化提供理论指导<sup>[128]</sup>。斯格明子材料与其他拓扑量子材料,包括超导材料的结合,可能会给量子计算提供新的增长点<sup>[129]</sup>。同时,与微纳器件加工工艺、CMOS 后端集成相兼容的材料体系也需要开展集中研究。在自旋拓扑物理的研究方面,电子、声子、磁振子等元激发会与拓扑磁结构相互作用,产生拓扑霍尔效应,斯格明子霍尔效应,拓扑反常能斯特效应等新的物理现象<sup>[60, 130]</sup>。这些研究不但能丰富我们对拓扑自旋物理的认知,也能为高效的斯格明子操控打下基础。斯格明子拓扑磁结构的确定性操控和探测,是拓扑存储、逻辑器件的前提<sup>[66, 131]</sup>。尽管利用电流<sup>[63]</sup>、电场<sup>[132]</sup>、超快激光<sup>[133]</sup>、应力<sup>[134]</sup>、X 射线脉冲<sup>[135]</sup>等方式,已经能产生和操控微米尺度的斯格明子。但其精准写入、移位、擦除目前还面临非常大的技术瓶颈,未来还需要持续攻关。此外,斯格明子研究已经步入了如何真正地实现相关的器件的讨论,实现室温小尺寸斯格明子原型存储和逻辑器件将是该领域接下来的重要目标。

拓扑自旋波在传播过程中具有边界态传输的特性,并且能够对形状缺陷免疫,对于实现自旋波器件的应用具有十分重要的意义。传统的 Damon-Eshbach 自旋波具有的拓扑本质使得自旋波只能在铁磁薄膜的表面传播,这种拓朴行为的来源是磁偶极相互作用<sup>[136]</sup>。近年来,诸多理论和实验工作在铁磁多层膜<sup>[137, 138]</sup>或二维磁子晶体结构<sup>[139, 140]</sup>体系中,证明了基于偶极相互作用的手性自旋波传播,并预言具有拓朴非平庸的自旋波边界态。最近,自旋轨道耦合与对称性破缺引起的界面型 DM 相互作用<sup>[141]</sup>在实验上被证明能够带来手性自旋波传播<sup>[142]</sup>。DM 相互作用引起的拓朴磁结构如磁斯格明子<sup>[143]</sup>等,能够为自旋波的调控增加新的维度。随着相关问题的解决和该领域的发展,拓朴自旋波有望应用于新一代超低功耗的磁子学器件以及基于自旋波的高频无线通讯技术。

### 3.4 高分辨拓扑磁结构表征与多场调控

最近的理论与实验表明,无论是块体材料还是多层膜中,斯格明子的自旋结构在三维空间中呈现出一个非常复杂的结构,而厘清这些三维磁结构对于斯格明子的调控具有重要意义。因此,发展新一代的三维磁结构表征技术迫在眉睫。当前,用于拓朴磁结构表征的实验手段主要包括:中子散射技术、洛伦兹透射电镜、磁圆二色-光发射电子显微镜(XMCD-PEEM)、自旋极化扫描隧道显微镜(SP-STM)、磁力显微镜、磁光克尔显微镜等。此外研制出室温稳定的小尺寸斯格明子材料体系仍然是一个不小的挑战,而实现斯格明子的精确调控及读出仍然值得关注。相比于铁磁斯格明子,反铁磁斯格明子因其具有无斯格明子霍尔效应、抗外场干扰、运动速度快等特性最近受到了广泛关注。但是,反铁磁材料对外不展现净磁矩,反铁磁斯格明子的研究迫切需要发展观测反铁磁磁畴的实验技术。最后,斯格明子随外场演化呈现出丰富的物理现象,因此通过理论、模拟、计算及实验表征斯格明子动力学演化过程将是考验多方协同合作的一个课题。研究斯格明子与不同外场的相互作用对于斯格明子器件的发展具有重要意义。

### 3.5 低维自旋材料、物理与器件原理

二维磁性材料及其异质结为自旋物理研究提供了新的研究平台,其独特的物理性质也有望用于研发下一代自旋器件。二维磁性材料因其超薄层厚、可旋转堆垛以及独特的电子输运和自旋性质,使其成为了研究在几何受限、对称性束缚条件下自旋输运特性的良好载体。基于二维磁性材料、强自旋轨道耦合材料及半导体材料的异质结,实现向非磁性材料中的高效自旋注入和探测,深入研究异质结界面中自旋输运和自旋弛豫过程以及对它们的有效调控手段,是当前需要研究的重要科学问题。在低维自旋体系中有望实现自旋超导态的材料理论设计和构建,从而实现自旋超导态的探测及其物理特性的研究与调控。通过二维磁性材料与多铁、超导等强关联体系的耦合调控,有望实现新奇的量子效应。超导和磁性的界面耦合可以诱导出自旋三重态超导并产生奇特的零- $\pi$  相位效应。如何构建基于二维磁性材料的磁性近邻效应异质结构并实现其衍生物理性质的探测和调控是非常重要的物理问题。以应用研究为导向是自旋物理研究的特点之一,其最终目标是发展在未来信息领域上产生重大变革的自旋器件,如自旋轨道矩器件、斯格明子器件、反铁磁器件、

腔自旋电子学器件、二维磁性自旋阀、自旋晶体管，以及自旋类脑、自旋概率比特和柔性自旋器件等新概念器件等。二维磁性材料及实空间拓扑自旋态为上述新型自旋器件提供了理想材料平台，尤其可以通过人工自旋体系构筑合适的长、短程相互作用，让材料体系产生类脑计算所需的记忆性、非线性、随机性等特点，甚至具备自我学习的能力，建立基于自旋物理体系的类脑计算。中心反演对称性破缺体系中存在非线性自旋输运效应，甚至会成为输运的主要贡献。非线性的自旋输运不仅在研究微观电子态等基础物理方面有重要的科学意义，也有望实现高频能量收集转换等应用。

#### 4 总结与展望

二维磁性及实空间拓扑物态为自旋物理中的新现象、新原理的研究提供了很好的平台，也提供了难得的机遇。论坛经过讨论提出以下建议：

(1) 建议自然科学基金委及时部署二维及拓扑自旋物理相关的研究项目，组织研究团队进行协作，发展独特的尖端仪器设备，以期获取一批高水平的研究成果，并推动成果的快速转化。

(2) 突出“从 0 到 1”原创导向，鼓励研究人员特别是青年科学家自由探索，勇于攀登科学高峰，实现世界范围内领先的原创性科研成果。

(3) 充分考虑自旋物理研究的交叉性特征，开展交叉复合型人才培养，建议协调组织物理、材料科学和工程、信息科学技术等多方面的研究团队，鼓励学科交叉合作，形成研究小组团簇，进行适度的竞争与合作，整合国内研究队伍，培养并形成一支高水平的自旋物理方面的人才队伍。

#### 参 考 文 献

- [1] Mermin ND, Wagner H. Absence of ferromagnetism or antiferromagnetism in one- or two-dimensional isotropic Heisenberg models. *Physical Review Letters*, 1966, 17(22): 1133.
- [2] Burch KS, Mandrus D, Park JG. Magnetism in two-dimensional van der Waals materials. *Nature*, 2018, 563(7729): 47—52.
- [3] Gong C, Zhang X. Two-dimensional magnetic crystals and emergent heterostructure devices. *Science*, 2019, 363(6428): eaav4450.
- [4] Blei M, Lado JL, Song Q, et al. Synthesis, engineering, and theory of 2D van der Waals magnets. *Applied Physics Reviews*, 2021, 8(2): 021301.
- [5] Kuo CT, Neumann M, Balamurugan K, et al. Exfoliation and Raman spectroscopic fingerprint of few-layer NiPS<sub>3</sub> van der Waals crystals. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 20904.
- [6] Lee JU, Lee S, Ryoo JH, et al. Ising-type magnetic ordering in atomically thin FePS<sub>3</sub>. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7433—7438.
- [7] Lin MW, Zhuang HL, Yan JQ, et al. Ultrathin nanosheets of CrSiTe<sub>3</sub>: a semiconducting two-dimensional ferromagnetic material. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(2): 315—322.
- [8] Gong C, Li L, Li ZL, et al. Discovery of intrinsic ferromagnetism in two-dimensional van der Waals crystals. *Nature*, 2017, 546(7657): 265—269.
- [9] Huang B, Clark G, Navarro-Moratalla E, et al. Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit. *Nature*, 2017, 546(7657): 270—273.
- [10] Lado JL, Fernández-Rossier J. On the origin of magnetic anisotropy in two dimensional CrI<sub>3</sub>. *2D Materials*, 2017, 4(3): 035002.
- [11] Liu SS, Yuan X, Zou YC, et al. Wafer-scale two-dimensional ferromagnetic Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> thin films grown by molecular beam epitaxy. *Npj 2D Materials and Applications*, 2017, 1(1): 30.
- [12] Wang YH, Xian C, Wang J, et al. Anisotropic anomalous Hall effect in triangular itinerant ferromagnet Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>. *Physical Review B*, 2017, 96(13): 134428.
- [13] Fei ZY, Huang B, Malinowski P, et al. Two-dimensional itinerant ferromagnetism in atomically thin Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>. *Nature Materials*, 2018, 17(9): 778—782.
- [14] Deng YJ, Yu YJ, Song YC, et al. Gate-tunable room-temperature ferromagnetism in two-dimensional Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>. *Nature*, 2018, 563(7729): 94—99.
- [15] Zhang Y, Xu HJ, Feng JF, et al. Magnetic two-dimensional van der Waals materials for spintronic devices. *Chinese Physics B*, 2021, 30(11): 118504.
- [16] Li HX, Wang LJ, Chen JS, et al. Molecular beam epitaxy grown Cr<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films with tunable Curie temperatures for spintronic devices. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2(11): 6809—6817.
- [17] Wen Y, Liu ZH, Zhang Y, et al. Tunable room-temperature ferromagnetism in two-dimensional Cr<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. *Nano Letters*, 2020, 20(5): 3130—3139.
- [18] Chu JW, Zhang Y, Wen Y, et al. Sub-millimeter-scale growth of one-unit-cell-thick ferrimagnetic Cr<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanosheets. *Nano Letters*, 2019, 19(3): 2154—2161.
- [19] Zhang ZW, Shang JZ, Jiang CY, et al. Direct photoluminescence probing of ferromagnetism in monolayer two-dimensional CrBr<sub>3</sub>. *Nano Letters*, 2019, 19(5): 3138—3142.



- [20] McGuire MA, Clark G, Santosh KC, et al. Magnetic behavior and spin-lattice coupling in cleavable van der Waals layered  $\text{CrCl}_3$  crystals. *Physical Review Materials*, 2017, 1: 014001.
- [21] Siberchicot B, Jobic S, Carteaux V, et al. Band structure calculations of ferromagnetic chromium tellurides  $\text{CrSiTe}_3$  and  $\text{CrGeTe}_3$ . *The Journal of Physical Chemistry*, 1996, 100(14): 5863—5867.
- [22] Zhuang HL, Xie Y, Kent PRC, et al. Computational discovery of ferromagnetic semiconducting single-layer  $\text{CrSnTe}_3$ . *Physical Review B*, 2015, 92(3): 035407.
- [23] Habib MR, Wang SP, Wang WJ, et al. Electronic properties of polymorphic two-dimensional layered chromium disulphide. *Nanoscale*, 2019, 11 (42): 20123—20132.
- [24] Lei CG, Ma YD, Zhang T, et al. Valley polarization in monolayer  $\text{CrX}_2$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$ ) with magnetically doping and proximity coupling. *New Journal of Physics*, 2020, 22(3): 033002.
- [25] Fang CM, van Bruggen CF, de Groot RA, et al. The electronic structure of the metastable layer compound. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1997, 9 (46): 10173.
- [26] Li B, Wan Z, Wang C, et al. Van der Waals epitaxial growth of air-stable  $\text{CrSe}_2$  nanosheets with thickness-tunable magnetic order. *Nature Materials*, 2021, 20(6): 818—825.
- [27] Sun XD, Li WY, Wang X, et al. Room temperature ferromagnetism in ultra-thin van der Waals crystals of  $1\text{T-CrTe}_2$ . *Nano Research*, 2020, 13(12): 3358—3363.
- [28] O'Hara DJ, Zhu TC, Trout AH, et al. Room temperature intrinsic ferromagnetism in epitaxial Manganese selenide films in the monolayer limit. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 3125—3131.
- [29] Bonilla M, Kolekar S, Ma YJ, et al. Strong room-temperature ferromagnetism in  $\text{VSe}_2$  monolayers on van der Waals substrates. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13 (4): 289—293.
- [30] Ataca C, Şahin H, Ciraci S. Stable, single-layer  $\text{MX}_2$  transition-metal oxides and dichalcogenides in a honeycomb-like structure. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(16): 8983—8999.
- [31] Fuh HR, Chang CR, Wang YK, et al. Newtype single-layer magnetic semiconductor in transition-metal dichalcogenides  $\text{VX}_2$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$  and  $\text{Te}$ ). *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 32625.
- [32] Li JH, Li Y, Du SQ, et al. Intrinsic magnetic topological insulators in van der Waals layered  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ -family materials. *Science Advances*, 2019, 5(6): eaaw5685.
- [33] Deng YJ, Yu YJ, Shi MZ, et al. Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ . *Science*, 2020, 367(6480): 895—900.
- [34] Jiang SW, Li LZ, Wang ZF, et al. Controlling magnetism in 2D  $\text{CrI}_3$  by electrostatic doping. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(7): 549—553.
- [35] Huang B, Clark G, Klein DR, et al. Electrical control of 2D magnetism in bilayer  $\text{CrI}_3$ . *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(7): 544—548.
- [36] Jiang SW, Shan J, Mak KF. Electric-field switching of two-dimensional van der Waals magnets. *Nature Materials*, 2018, 17(5): 406—410.
- [37] Cao Y, Zhang XM, Zhang XP, et al. Room-temperature van der waals perpendicular ferromagnet through interlayer magnetic coupling. *Physical Review Applied*, 2022, 17 (5): L051001.
- [38] Chen W, Sun ZY, Wang ZJ, et al. Direct observation of van der Waals stacking-dependent interlayer magnetism. *Science*, 2019, 366(6468): 983—987.
- [39] Sun Y, Xiao RC, Lin GT, et al. Effects of hydrostatic pressure on spin-lattice coupling in two-dimensional ferromagnetic  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ . *Applied Physics Letters*, 2018, 112(7): 072409.
- [40] Lin ZS, Lohmann M, Ali ZA, et al. Pressure-induced spin reorientation transition in layered ferromagnetic insulator  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ . *Physical Review Materials*, 2018, 2 (5): 051004.
- [41] Wang X, Tang J, Xia XX, et al. Current-driven magnetization switching in a van der Waals ferromagnet  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ . *Science Advances*, 2019, 5(8): eaaw8904.
- [42] Alghamdi M, Lohmann M, Li JX, et al. Highly efficient spin-orbit torque and switching of layered ferromagnet  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ . *Nano Letters*, 2019, 19(7): 4400—4405.
- [43] Ostwal V, Shen TT, Appenzeller J. Efficient spin-orbit torque switching of the semiconducting van der waals ferromagnet  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ . *Advanced Materials*, 2020, 32 (7): 1906021.
- [44] Mogi M, Yasuda K, Fujimura R, et al. Current-induced switching of proximity-induced ferromagnetic surface states in a topological insulator. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1404.
- [45] Nair NL, Maniv E, John C, et al. Electrical switching in a magnetically intercalated transition metal dichalcogenide. *Nature Materials*, 2020, 19(2): 153—157.
- [46] Ye C, Xie XN, Lv WX, et al. Nonreciprocal transport in a bilayer of  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  and Pt. *Nano Letters*, 2022, 22(3): 1366—1373.
- [47] Serlin M, Tschirhart CL, Polshyn H, et al. Intrinsic quantized anomalous Hall effect in a moiré heterostructure. *Science*, 2020, 367(6480): 900—903.
- [48] Kao IH, Muzzio R, Zhang HT, et al. Deterministic switching of a perpendicularly polarized magnet using unconventional spin-orbit torques in  $\text{WTe}_2$ . *Nature Materials*, 2022, 21(9): 1029—1034.

- [49] Zhang PY, Chung TF, Li QW, et al. All-optical switching of magnetization in atomically thin  $\text{CrI}_3$ . *Nature Materials*, 2022, 21(12): 1373–1378.
- [50] Wang Z, Gutiérrez-Lezama I, Ubrig N, et al. Very large tunneling magnetoresistance in layered magnetic semiconductor  $\text{CrI}_3$ . *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2516.
- [51] Song TC, Cai XH, Tu MWY, et al. Giant tunneling magnetoresistance in spin-filter van der waals heterostructures. *Science*, 2018, 360(6394): 1214–1218.
- [52] Kim HH, Yang BW, Patel T, et al. One million percent tunnel magnetoresistance in a magnetic van der waals heterostructure. *Nano Letters*, 2018, 18(8): 4885–4890.
- [53] Zhong D, Seyler KL, Linpeng XY, et al. Van der Waals engineering of ferromagnetic semiconductor heterostructures for spin and valleytronics. *Science Advances*, 2017, 3(5): e1603113.
- [54] Wang Z, Sapkota D, Taniguchi T, et al. Tunneling spin valves based on  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2/\text{hBN}/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  van der waals heterostructures. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4303–4308.
- [55] Albarakati S, Tan C, Chen ZJ, et al. Antisymmetric magnetoresistance in van der Waals  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2/\text{graphite}/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  trilayer heterostructures. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaaw0409.
- [56] Zhu WK, Lin HL, Yan FG, et al. Large tunneling magnetoresistance in van der waals ferromagnet/semiconductor heterojunctions. *Advanced Materials*, 2021, 33(51): 2104658.
- [57] Zhang GJ, Guo F, Wu H, et al. Above-room-temperature strong intrinsic ferromagnetism in 2D van der Waals  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  with large perpendicular magnetic anisotropy. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5067.
- [58] Zhu WK, Xie SH, Lin HL, et al. Large room-temperature magnetoresistance in van der waals ferromagnet/semiconductor junctions. *Chinese Physics Letters*, 2022, 39(12): 128501.
- [59] Mühlbauer S, Binz B, Jonietz F, et al. Skyrmion lattice in a chiral magnet. *Science*, 2009, 323(5916): 915–919.
- [60] Nagaosa N, Tokura Y. Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(12): 899–911.
- [61] Wei WS, He ZD, Qu Z, et al. Dzyaloshinsky-Moriya interaction (DMI)-induced magnetic skyrmion materials. *Rare Metals*, 2021, 40(11): 3076–3090.
- [62] Wang WW, Song DS, Wei WS, et al. Electrical manipulation of skyrmions in a chiral magnet. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1593.
- [63] Jiang WJ, Upadhyaya P, Zhang W, et al. Blowing magnetic skyrmion bubbles. *Science*, 2015, 349(6245): 283–286.
- [64] Heinze S, von Bergmann K, Menzel M, et al. Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions. *Nature Physics*, 2011, 7(9): 713–718.
- [65] Guang Y, Bykova I, Liu YZ, et al. Creating zero-field skyrmions in exchange-biased multilayers through X-ray illumination. *Nature Communications*, 2020, 11: 949.
- [66] Fert A, Cros V, Sampaio J. Skyrmions on the track. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(3): 152–156.
- [67] Guang Y, Zhang LK, Zhang JW, et al. Electrical detection of magnetic skyrmions in a magnetic tunnel junction. *Advanced Electronic Materials*, 2023, 9(1): 2200570.
- [68] Tai JSB, Smalyukh II. Static Hopf solitons and knotted emergent fields in solid-state noncentrosymmetric magnetic nanostructures. *Physical Review Letters*, 2018, 121(18): 187201.
- [69] Wang X, Qaiumzadeh A, Brataas A. Current-driven dynamics of magnetic hopfions. *Physical Review Letters*, 2019, 123(14): 147203.
- [70] Liu YZ, Hou WT, Han XF, et al. Three-dimensional dynamics of a magnetic hopfion driven by spin transfer torque. *Physical Review Letters*, 2020, 124(12): 127204.
- [71] Kent N, Reynolds N, Raftrey D, et al. Creation and observation of Hopfions in magnetic multilayer systems. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1562.
- [72] Fujimoto S. Hall effect of spin waves in frustrated magnets. *Physical Review Letters*, 2009, 103(4): 047203.
- [73] Katsura H, Nagaosa N, Lee PA. Theory of the thermal Hall effect in quantum magnets. *Physical Review Letters*, 2010, 104(6): 066403.
- [74] Onose Y, Ideue T, Katsura H, et al. Observation of the magnon Hall effect. *Science*, 2010, 329(5989): 297–299.
- [75] Matsumoto R, Murakami S. Theoretical prediction of a rotating magnon wave packet in ferromagnets. *Physical Review Letters*, 2011, 106(19): 197202.
- [76] Zhang LF, Ren J, Wang JS, et al. Topological magnon insulator in insulating ferromagnet. *Physical Review B*, 2013, 87(14): 144101.
- [77] Mook A, Henk J, Mertig I. Edge states in topological magnon insulators. *Physical Review B*, 2014, 90(2): 024412.
- [78] Shindou R, Ohe JI, Matsumoto R, et al. Chiral spin-wave edge modes in dipolar magnetic thin films. *Physical Review B*, 2013, 87(17): 174402.
- [79] Chisnell R, Helton J, Freedman D, et al. Topological magnon bands in a kagome lattice ferromagnet. *Physical Review Letters*, 2015, 115(14): 147201.
- [80] Owerre SA. A first theoretical realization of honeycomb topological magnon insulator. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2016, 28(38): 386001.
- [81] Kim SK, Ochoa H, Zarzuela R, et al. Realization of the Haldane-Kane-mele model in a system of localized spins. *Physical Review Letters*, 2016, 117(22): 227201.

- [82] Cheng R, Okamoto S, Xiao D. Spin Nernst effect of magnons in collinear antiferromagnets. *Physical Review Letters*, 2016, 117(21): 217202.
- [83] Wang XS, Su Y, Wang XR. Topologically protected unidirectional edge spin waves and beam splitter. *Physical Review B*, 2017, 95: 014435.
- [84] Wang X, Zhang H, Wang X. Topological magnonics: a paradigm for spin-wave manipulation and device design. *Physical Review Applied*, 2018, 9(2): 024029.
- [85] Wang X, Brataas A, Troncoso RE. Bosonic bott index and disorder-induced topological transitions of magnons. *Physical Review Letters*, 2020, 125(21): 217202.
- [86] Li ZX, Cao YS, Wang XR, et al. Second-order topological solitonic insulator in a breathing square lattice of magnetic vortices. *Physical Review B*, 2020, 101(18): 184404.
- [87] Li ZX, Cao YS, Wang XR, et al. Symmetry-protected zero modes in metamaterials based on topological spin texture. *Physical Review Applied*, 2020, 13(6): 064058.
- [88] National Academies of Sciences E, Horowitz M, Grumblin E. *Quantum computing: progress and prospects*. Washington, DC: the National Academies Press, 2019.
- [89] Yutaka T, Seiichiro I, Atsushi N, et al. Coherent coupling between a ferromagnetic magnon and a superconducting qubit. *Science*, 2015, 349(6246): 405—408.
- [90] Huebl H, Zolitsch CW, Lotze J, et al. High cooperativity in coupled microwave resonator ferrimagnetic insulator hybrids. *Physical Review Letters*, 2013, 111(12): 127003.
- [91] Zhang XF, Zou CL, Jiang L, et al. Strongly coupled magnons and cavity microwave photons. *Physical Review Letters*, 2014, 113(15): 156401.
- [92] Bai LH, Harder M, Chen Y, et al. Spin pumping in electro-dynamically coupled magnon-photon systems. *Physical Review Letters*, 2015, 114(22): 227201.
- [93] Wang YP, Zhang GQ, Zhang DK, et al. Bistability of cavity magnon polaritons. *Physical Review Letters*, 2018, 120(5): 057202.
- [94] Yuan HY, Cao YS, Kamra A, et al. Quantum magnonics: when magnon spintronics meets quantum information science. *Physics Reports*, 2022, 965: 1—74.
- [95] Zare Rameshti B, Viola Kusminskiy S, Haigh JA, et al. Cavity magnonics. *Physics Reports*, 2022, 979: 1—61.
- [96] Lachance-Quirion D, Wolski SP, Tabuchi Y, et al. Entanglement-based single-shot detection of a single magnon with a superconducting qubit. *Science*, 2020, 367(6476): 425—428.
- [97] Zhao JM, Bragas AV, Lockwood DJ, et al. Magnon squeezing in an antiferromagnet: reducing the spin noise below the standard quantum limit. *Physical Review Letters*, 2004, 93(10): 107203.
- [98] Sharma S, Bittencourt VASV, Karenowska AD, et al. Spin cat states in ferromagnetic insulators. *Physical Review B*, 2021, 103(10): L100403.
- [99] Yuan H, Yan P, Zheng SS, et al. Steady bell state generation via magnon-photon coupling. *Physical Review Letters*, 2020, 124(5): 053602.
- [100] Verzhbitskiy IA, Kurebayashi H, Cheng HX, et al. Controlling the magnetic anisotropy in  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  by electrostatic gating. *Nature Electronics*, 2020, 3(8): 460—465.
- [101] Zhang HR, Raftrey D, Chan YT, et al. Room-temperature skyrmion lattice in a layered magnet  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_5\text{GeTe}_2$ . *Science Advances*, 2022, 8(12): eabm7103.
- [102] Chen X, Schierle E, He Y, et al. Antiferromagnetic order in Co-doped  $\text{Fe}_5\text{GeTe}_2$  probed by resonant magnetic X-ray scattering. *Physical Review Materials*, 2022, 6(9): 094404.
- [103] Li Q, Yang MM, Gong C, et al. Patterning-induced ferromagnetism of  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  van der waals materials beyond room temperature. *Nano Letters*, 2018, 18(9): 5974—5980.
- [104] O'Neill A, Rahman S, Zhang Z, et al. Enhanced room temperature ferromagnetism in highly strained 2D semiconductor  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ . *ACS Nano*, 2023, 17(1): 735—742.
- [105] Ni ZL, Haglund AV, Wang H, et al. Imaging the Néel vector switching in the monolayer antiferromagnet  $\text{MnPSe}_3$  with strain-controlled Ising order. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(7): 782—787.
- [106] Tong QJ, Liu F, Xiao J, et al. Skyrmions in the moiré of van der waals 2D magnets. *Nano Letters*, 2018, 18(11): 7194—7199.
- [107] Liu B, Liu SS, Yang L, et al. Light-tunable ferromagnetism in atomically thin  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  driven by femtosecond laser pulse. *Physical Review Letters*, 2020, 125(26): 267205.
- [108] Tu J, Chen XB, Ruan XZ, et al. Direct observation of hidden spin polarization in 2H- $\text{MoTe}_2$ . *Physical Review B*, 2020, 101(3): 035102.
- [109] Tu J, Zhao YF, Zhang XQ, et al. Impurity band assisted carrier relaxation in Cr doped topological insulator  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . *Applied Physics Letters*, 2021, 118(8): 081103.
- [110] Zhou JD, Zhang WJ, Lin YC, et al. Heterodimensional superlattice with in-plane anomalous Hall effect. *Nature*, 2022, 609(7925): 46—51.
- [111] Ding B, Li ZF, Xu GZ, et al. Observation of magnetic skyrmion bubbles in a van der waals ferromagnet  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ . *Nano Letters*, 2020, 20(2): 868—873.

- [112] Gao Y, Yin QW, Wang Q, et al. Spontaneous (anti) meron chains in the domain walls of van der Waals ferromagnetic  $\text{Fe}_{5-x}\text{GeTe}_2$ . *Advanced Materials*, 2020, 32(48): 2005228.
- [113] Buzdin AI. Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(3): 935.
- [114] Linder J, Robinson JWA. Superconducting spintronics. *Nature Physics*, 2015, 11(4): 307–315.
- [115] Yang H, Yang SH, Takahashi S, et al. Extremely long quasiparticle spin lifetimes in superconducting aluminium using MgO tunnel spin injectors. *Nature Materials*, 2010, 9(7): 586–593.
- [116] Kim SK, Myers R, Tserkovnyak Y. Nonlocal spin transport mediated by a *Vortex* liquid in superconductors. *Physical Review Letters*, 2018, 121(18): 187203.
- [117] Bergeret FS, Volkov AF, Efetov KB. Long-range proximity effects in superconductor-ferromagnet structures. *Physical Review Letters*, 2001, 86(18): 4096.
- [118] Khaire TS, Khasawneh MA, Pratt WP, et al. Observation of spin-triplet superconductivity in Co-based Josephson junctions. *Physical Review Letters*, 2010, 104(13): 137002.
- [119] Högl P, Matos-Abiague A, Žutić I, et al. Magnetoanisotropic Andreev reflection in ferromagnet-superconductor junctions. *Physical Review Letters*, 2015, 115(11): 116601.
- [120] Cai RR, Yao YY, Lv P, et al. Evidence for anisotropic spin-triplet Andreev reflection at the 2D van der Waals ferromagnet/superconductor interface. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6275.
- [121] Nadj-Perge S, Drozdov IK, Li J, et al. Observation of *Majorana* fermions in ferromagnetic atomic chains on a superconductor. *Science*, 2014, 346(6209): 602–607.
- [122] Gingrich EC, Niedzielski BM, Glick JA, et al. Controllable  $0-\pi$  Josephson junctions containing a ferromagnetic spin valve. *Nature Physics*, 2016, 12(6): 564–567.
- [123] Kezilebieke S, Huda MN, Vaño V, et al. Topological superconductivity in a van der Waals heterostructure. *Nature*, 2020, 588(7838): 424–428.
- [124] Feofanov AK, Oboznov VA, Bol'ginov VV, et al. Implementation of superconductor/ferromagnet/superconductor  $\pi$ -shifters in superconducting digital and quantum circuits. *Nature Physics*, 2010, 6(8): 593–597.
- [125] Yamashita T, Tanikawa K, Takahashi S, et al. Superconducting  $\pi$ Qubit with a ferromagnetic Josephson junction. *Physical Review Letters*, 2005, 95(9): 097001.
- [126] Yao YY, Cai RR, Yu T, et al. Giant oscillatory Gilbert damping in superconductor/ferromagnet/superconductor junctions. *Science Advances*, 2021, 7(48): eabh3686.
- [127] Jiang WJ, Chen G, Liu K, et al. Skyrmions in magnetic multilayers. *Physics Reports*, 2017, 704: 1–49.
- [128] Yang HX, Thiaville A, Rohart S, et al. Anatomy of dzyaloshinskii-moriya interaction at Co/Pt interfaces. *Physical Review Letters*, 2015, 115(26): 267210.
- [129] Hals KM, Schechter M, Rudner MS. Composite topological excitations in ferromagnet-superconductor heterostructures. *Physical Review Letters*, 2016, 117(1): 017001.
- [130] Jiang WJ, Zhang XC, Yu GQ, et al. Direct observation of the skyrmion Hall effect. *Nature Physics*, 2017, 13(2): 162–169.
- [131] Sampaio J, Cros V, Rohart S, et al. Nucleation, stability and current-induced motion of isolated magnetic skyrmions in nanostructures. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(11): 839–844.
- [132] Hsu PJ, Kubetzka A, Finco A, et al. Electric-field-driven switching of individual magnetic skyrmions. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(2): 123–126.
- [133] Je SG, Vallobra P, Srivastava T, et al. Creation of magnetic skyrmion bubble lattices by ultrafast laser in ultrathin films. *Nano Letters*, 2018, 18(11): 7362–7371.
- [134] Wang YD, Wang L, Xia J, et al. Electric-field-driven non-volatile multi-state switching of individual skyrmions in a multiferroic heterostructure. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3577.
- [135] Guang Y, Peng Y, Yan ZR, et al. Electron beam lithography of magnetic skyrmions. *Advanced Materials*, 2020, 32(39): 2003003.
- [136] Yamamoto K, Thiang GC, Pirro P, et al. Topological characterization of classical waves: the topological origin of magnetostatic surface spin waves. *Physical Review Letters*, 2019, 122(21): 217201.
- [137] Hu ZQ, Fu L, Liu LQ. Tunable magnonic Chern bands and chiral spin currents in magnetic multilayers. *Physical Review Letters*, 2022, 128(21): 217201.
- [138] Chen JL, Yu T, Liu CP, et al. Excitation of unidirectional exchange spin waves by a nanoscale magnetic grating. *Physical Review B*, 2019, 100(10): 104427.
- [139] Shindou R, Matsumoto R, Murakami S, et al. Topological chiral magnonic edge mode in a magnonic crystal. *Physical Review B*, 2013, 87(17): 174427.
- [140] Li YM, Xiao J, Chang K. Topological magnon modes in patterned ferrimagnetic insulator thin films. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 3032–3037.
- [141] Yu T, Luo ZC, Bauer GEW. Chirality as generalized spin-orbit interaction in spintronics. *Physics Reports*, 2023, 1009: 1–115.
- [142] Wang HC, Chen JL, Liu T, et al. Chiral spin-wave velocities induced by all-garnet interfacial dzyaloshinskii-moriya interaction in ultrathin yttrium iron garnet films. *Physical Review Letters*, 2020, 124(2): 027203.
- [143] Chen JL, Hu JF, Yu HM. Chiral emission of exchange spin waves by magnetic skyrmions. *ACS Nano*, 2021, 15(3): 4372–4379.

## Two-dimensional Magnetism and Topological Spin Physics

Zhe Yuan<sup>1</sup>      Guoqiang Yu<sup>2</sup>      Wei Han<sup>3</sup>      Shouguo Wang<sup>4</sup>      Kaiyou Wang<sup>5</sup>  
Yizheng Wu<sup>6</sup>      Ke Xia<sup>7</sup>      Xiangwei Jiang<sup>8</sup>      Peigen Ni<sup>8\*</sup>

1. *Institute for Nanoelectronic Devices and Quantum Computing, Fudan University, Shanghai 200433*
2. *Institutes of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*
3. *School of Physics, Peking University, Beijing 100871*
4. *School of Materials Science and Engineering, Anhui University, Hefei 230601*
5. *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*
6. *Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433*
7. *School of Physics, Southeast University, Nanjing 210096*
8. *Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

**Abstract** In the 309<sup>th</sup> Shuangqing Forum, the recent progresses of two-dimensional magnetism and topological spin physics has been systematically reviewed and the opportunities and challenges in future development are summarized. Major research categories in these research fields are clarified, including the search for new materials with high critical temperature, topological and chiral spin physics, and the discovery and characterization of novel topological magnetic structures, etc, and the scientific funding strategies are provided. Several major key scientific topics of this area have been concluded, which should be paid sufficient attention in the next 5~10 years, including (1) physical properties of two-dimensional magnetic materials and their heterogeneous structures; (2) topology in magnetism and spin physics; (3) high resolution characterization of topological magnetic structures and multi-field regulation; (4) low-dimensional spin materials, their physics and working principles for devices. Based on the analysis of current situation and the outlook for two-dimensional magnetism and topological spin physics, we provide some suggestions for further development.

**Keywords** two-dimensional magnetism; topological magnetism; spintronics; characterization of topological magnetic structure

(责任编辑 崔国增 张强)

---

\* Corresponding Author, Email: nipg@nsfc.gov.cn