

华中科技大学物理学院教授于涛

手征是一种广义的自旋轨道耦合

■文 / 徐 飞

自旋电子学利用“自旋”作为载体对信息进行处理。经过二十多年的发展，自旋电子学已经成为了一个分支众多、研究对象多样化且机理极为丰富的交叉领域。这一学科积累的丰富知识不仅具有重要的科学价值，而且在磁存储、集成电路和量子技术等方向具有很大的应用前景。

这里“自旋”通常指的是电子的自旋，它能够与电子的空间运动，即“轨道”锁定起来，即教科书上的自旋轨道耦合。自旋轨道耦合时是否存在无耗散的自旋流？这一问题催生了拓扑绝缘体的发现。利用自旋轨道耦合有效激发自旋流进而反转磁体的磁矩已成为一个可产业化的重要方向。然而，基于电子自旋的电子学也面临对注入效率低、输运耗散高、探测过程复杂等问题。

从点出发

找寻携带“自旋”并且能够与“轨道”等自由度耦合起来的新的载流子成为了一个重要的突破点。首先需要解决基础概念上的一些问题：其他载流子，如光子、声子、磁子、电极化子等是否具有“自旋”；其次，它们的“自旋”是否能够与轨道耦合；最后，这些载流子“自旋”是否可以互相转化，转化的效率如



何等。这要求理论上对量子材料中性质迥异的各种载流子之间自旋的转化和输运规律进行系统和深入地探索，建立普适的规律，为应用打下基础。针对这些问题，华中科技大学物理学院于涛教授和日本东北大学 Gerrit E. W. Bauer 教授合作进行了系统的研究。他们发现近场的光子、声子、磁子等具有横向“自旋”，这一自旋与动量是锁定的，或者说是手征的；在时间反演对称破缺时，这一横向自旋的运动变成单向的；这一横向自旋在不同载流子间，特别是与电子转化时近似守恒。他们将这规律归结为一句话：“手征是一种广义的自旋轨道耦

合”，这成为他们获邀撰写的 *Physics Reports* 130 多页综述的核心思想。这一新的视角可能为磁性和自旋电子学带来新的维度。

“Finding things out”。著名物理学家费曼的这句话成为于涛进行物理学研究的出发点。理论家基于自己的直觉和兴趣去探寻新的方向。于涛团队的研究从点出发，然后点连成线，线形成面，最后复杂的问题变得简单，最后的结论往往就是一句话，捅破了窗户纸。

于涛五年前的研究是从磁性绝缘体中磁子的输运开始的。于涛提到，“这是一个重要的方向，因为大家发现磁性

绝缘体的磁子可以传输得很远。当时很多人关注一种表面波，在磁体很厚的时候会出现，它只沿着一个方向传输。”磁体很薄时，于涛和合作者发现，这种表面波就消失了，成为了普通的体波，可以沿着两个方向传播。

当计算这些体波在磁体外的磁场时，他们惊奇地发现出现了单方向传输的近场磁场。这意味着在磁体附近放上一个磁纳米结构，它就只能和一个方向传输的体波耦合，即偶极相互作用成为一种手征相互作用。为此于涛研发了一套量子热动力学理论，预言了单方向的自旋泵浦、手征自旋塞贝克效应和自旋阻塞等众多新的自旋电子学功能。

于涛与合作者将理论和实验进行了细致的比较，最终证实了自己的很多预言。这为在磁性绝缘体中运用手征控制自旋输运奠定了基础。

“这一工作前后我们写了好几篇文章，但还是不彻底明白为什么近场的磁场成为单方向的。”于涛说，“我们想，这里因为有磁性，那么时间反演对称性是破缺了。有时间反演对称的话会怎么样呢？”。2015年以来，磁学中发现磁性球中的磁子与光腔中微波光子的相干耦合强度远大于耗散，从而有望实现磁子与微波光子之间的量子调控。在这个背景下，于涛和合作者开始找寻能够实现磁子只和一个方向传播的光进行耦合的理论方案。他们发现最普通的波导就可以实现这一设计，在一些特殊的平面上电磁场的旋转方向和运动方向锁定在一起。如果在里面放很多磁体的话，这些磁体之间通过光作为媒介的有效耦合也是单方向的，即左边的磁体可以影响右边的，但是右边的不影响左边的，似乎没有了反作用力。由于能量是单方向传输的，那么最后它会积累在边界的磁

体上，即自旋趋肤效应。于涛和合作者证明了存在非拓扑和拓扑保护两类自旋趋肤效应。

深入探求

“冰山一角已经揭开，似乎可以更深入地寻找一些独特的功能。当时就感觉越来越好玩了。”于涛提到，“我就去想，这些手征的相互作用激发的自旋流总是单方向的，它是否如同电子的自旋流那样能够操纵磁矩呢？”如果沿一个方向搅拌蜂蜜，因为蜂蜜有粘性，蜂蜜的流动不会随着搅拌力的增大而线性增大。受这一现象启发，于涛发现了磁子的非线性所诱导的多普勒效应：磁子自旋流比较大时会和磁体中的磁矩耦合起来，从而影响磁性本身的状态。这类似于电子的自旋流可以反转磁体的磁矩。当磁子自旋流很大时，磁体的基态就会不稳定，这意味着磁性材料所承载的最大自旋流是有限的。

“经过两三年的研究，我当时已经有了不少经验，但是我感觉地图上还是缺失了声子这一重要元素。我们就去研究声子和别的载流子是否可以手征地

耦合起来。”于涛回忆，“这一找就是一年多，大部分方案都不行。但是德国Mainz的会议启发了我，会议上有学者展示了水面上的波怎么运动。他提到波的运动方向和水分子沿水面旋转的方向是锁定的。这是所有问题的关键之处。”于涛和合作者就开始研究表面声波和放置在其上的纳米磁体的耦合，很快他们就揭示磁弹性耦合的手征性。几乎与此同时，国际上至少有三个实验组都观测到了表面声子和磁子耦合的方向性。这可能为高效激发高频表面声子和利用磁学（而非电学）调控声子的相干输运提供了可能。

“至此，我们感觉想研究的载流子差不多了，但是还是没有有一个统一的图像。这些载流子本质上都是波，它们似乎都有像自旋那样在旋转。它的运动有时候会是单方向的，有时候会是两个方向但是会和旋转方向锁定，没有统一的认识。”于涛指出，“我当时只是模糊地感觉得统一一下。问题在我回国参加了一个会议，和一位学者的闲聊中明确了。他问我表面自旋波的问题，建议我去看一下光波“横向”自旋的文章。我



就意识到光波如果有横向的自旋，其他波可能也有。这个横向自旋如果有用，就必须能够和电子自旋转化的规律。”为此，于涛展开了光的近场自旋泵浦的研究。于涛和合作者经过研究发展了一套非线性响应理论证明了近场光的横向自旋与电子自旋转换的守恒律。这一非接触型自旋泵浦机制可能会有所应用，因为它有望克服在常规半导体材料注入电子自旋流时效率很低这一难题。

“我对超导一直保持兴趣，我读博期间在导师指导下研究了好几年超导自旋电子学，建立了规范不变的超导体自旋和电荷动力学方程组。”于涛回顾，“因此我尝试把磁性中获得的知识用到超导。当时的机会就是曹原等发现的魔角石墨烯中的超导，他们发现超导的输运比较奇怪，与晶格的对称性不同。”于涛和合作者在金兹伯格-朗道的方程中观察到如果将手征超导中的两个序参量当成两种自旋，那么平面内的磁场就能耦合它们，这能驱动超导电性由手征相向液晶相转变。这一理论解释了扭角石墨烯中重要实验现象，也预言了液晶相的反常霍尔效应。许多同行发函表示对这一问题非常感兴趣。

再攀高峰

2021年，于涛从德国马克斯普朗克物质结构与动力学研究所来到华中科技大学物理学院任教。同时，他也担任德国马普所的客座研究员和 *Frontiers in Physics* 的客座编辑，负责手征自旋电子学的专刊。于涛团队目前的研究重点是量子材料中的“自旋”动力学。

于涛说：“我们关注的关键问题是研究自旋物态的高效调控、不同载流子之间自旋的高效转化和低耗散输运。”他还说：“我对凝聚态物理感兴趣，是



因为凝聚态物理研究的尺度从微观到介观、再到宏观，涉及凝聚态物质的电荷、原子和自旋等运动规律，包罗万象，充满了奇妙的现象和潜在的应用价值。”他希望自己和团队能够沉下心来，探索自旋和超导领域奇妙现象的物理本质，探索新的效应和新的规律，做出由无到有的研究。

目前，于涛正在为本科生讲授电动力学，也为研究生讲解多体物理。于涛采用与他科研风格类似的方式，提出一些现象启发大家去发现问题，然后把

问题逐步用数学的方式表达出来，讲授如何去解决这些问题，鼓励大家自我探索。

在不明就里的围观者看来，基础科学的研究相当枯燥乏味，但是对业内人士而言，从研究中体会到探索的乐趣和进步的骄傲是努力的方向，也会成为水到渠成的必然。于涛带领团队在自我驱动和自我变革中不断精进，百折不挠，矢志不渝。相信于涛团队会为中国自旋电子学做出更大的贡献！