

1 拓扑绝缘体和量子反常霍尔效应

拓扑绝缘体是一类新奇的量子物态，不同于传统意义上的金属或绝缘体。它的体态是有能隙的半导体/绝缘体，表面则表现为没有能隙的金属态。这种完全由材料体态电子结构的拓扑性质所决定的表面态，由于受到对称性的保护，基本不受杂质或无序的影响，非常稳定。因此，拓扑绝缘体有望从根本上解决现有电子技术的难题，带动产业技术的革命。

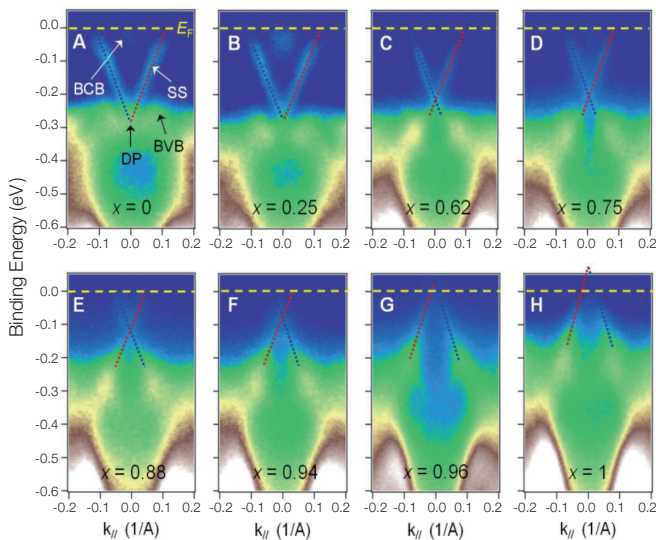
物理所的研究人员很早就介入到拓扑绝缘体的研究中，与几个国际著名小组一起并肩站在该领域的国际前沿，并在很大程度上引领了世界潮流。他们首次通过理论计算预言了新型的第二代拓扑绝缘体材料体系 Bi_2Se_3 、 Bi_2Te_3 和 Sb_2Te_3 ，这是人类首次发现可在室温下存在的三维强拓扑绝缘体，并且其体能隙达到了 0.3 eV 的量级，完全能用于现有电子学技术。随后他们首次实验制备了高质量的 Bi_2Se_3 、 Bi_2Te_3 和 Sb_2Te_3 的外延单晶薄膜，并利用 STM、ARPES 等先进手段观测到了该拓扑绝缘体表面态的螺旋状自旋结构，该拓扑绝缘体的三维电子态到二维电子态的演化及其表面态的朗道能级与量子震荡行为。随后又利用高压手段观察到了拓扑绝缘体中的超导态，使得拓扑超导体的实现成为可能。此外，在未知

类型的拓扑有序量子态的探索方面取得了重要进展，从理论上预言了一类新的没有时间反演对称性的拓扑绝缘体——磁性拓扑绝缘体。

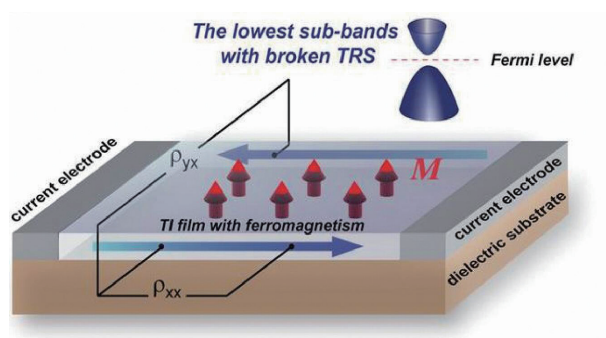
在该方向上，物理所理论计算先行、紧密结合实验研究，在 *Science*、*Nature Phys.*、*PRL*、*APL*、*Adv. Mater.* 等高端期刊发表文章 30 余篇，关键文献在一年内单篇被引用超过 100 次，直接引发了目前国际上对拓扑绝缘体的研究热潮。在该领域，一支强有力的“理论+计算+实验”的研究队伍已经形成，并极大地推动了国内外相关领域的发展。相关研究团队成员于 2011 年分别获得求是杰出科技成就集体奖和中国科学院杰出科技成就奖。

量子霍尔效应是整个凝聚态物理领域最重要、最基本的量子效应之一。1980 年，德国科学家 Klitzing 发现了“整数量子霍尔效应”，并于 1985 年获诺贝尔物理学奖。1982 年，美籍华人物理学家崔琦和美国科学家 Störmer 等又发现了“分数量子霍尔效应”，不久，由美国物理学家 Laughlin 给出理论解释，他们三人分享了 1998 年的诺贝尔物理学奖。在量子霍尔效应家族里一个长期未被发现的是“量子反常霍尔效应”——不需要外加磁场的量子霍尔效应。

2010 年，物理所方忠、戴希带领的团队与张首晟等合作，从理论上提出 Cr 或 Fe 磁性离子掺杂的拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 、 Bi_2Te_3 和 Sb_2Te_3 等是实现量子反常霍尔效应的最佳体系。该发现引起了国际上的广泛兴趣，许多世界顶级实验室都争相沿着这个思路寻找量子反常霍尔效应。2013 年，物理所何珂、吕力、马旭村、王立莉、方忠、戴希等组成的团队和清华大学物理系薛其坤、张首晟、王亚愚、陈曦、贾金锋等组成的团队合作攻关，克服了薄膜生长、磁性掺杂、门电压控制、低温输运测量等多道难关，一步步实现了对拓扑绝缘体的电子结构、长程铁磁序以及能带拓扑结构的精密调控，利



拓扑绝缘体



量子反常霍尔效应

用分子束外延方法生长出了高质量的Cr掺杂(Bi, Sb) $_2$ Te $_3$ 拓扑绝缘体磁性薄膜,并在极低温输运测量装置上成功地观测到了“量子反常霍尔效应”。这是国际上该领域的一项重要科学突破, *Science* 以“完整的量子霍尔三重奏”为题进行了报道。该物理效应从理论研究到实验观测的全过程,均由我国科学家独立完成。

专家点评

量子反常霍尔效应是从中国的实验室里第一次做出了诺贝尔奖级的物理学成绩,不仅是科学界的喜事,也是整个国家的喜事。

点评专家

杨振宁 清华大学高等研究院教授,香港中文大学博文讲座教授,中科院外籍院士、美国科学院院士、“中央研究院”院士、俄罗斯科学院院士、教廷宗座科学院院士、巴西科学院院士、委内瑞拉科学院院士、西班牙皇家科学院院士、英国皇家学会会员等。历任美国芝加

哥大学讲师、普林斯顿高等研究院研究员、纽约州立大学石溪分校教授兼物理研究所所长。1949年,与恩利克·费米合作,提出基本粒子第一个复合模型。1956年与李政道合作,提出“弱相互作用中宇称不守恒理论”,并共同获1957年诺贝尔物理学奖。