

个矛盾点是，大部分铁磁材料都是导电的，二维情形下很难实现铁磁性，以及磁性和拓扑很难做到共存。这就相当于，你要制备出一种像‘三项全能运动员’一样的材料。”薛其坤说，“在这项研究上，我们投入了四年多时间，制备了一千多种样品，参与项目的学生就有二十多个人。”

从2008年起，薛其坤团队利用分子束外延生长-低温强磁场扫描隧道显微镜-角分辨光电子能谱相结合的独特技术手段，开始对拓扑绝缘体开展研究。他们首次建立了Bi₂Te₃家族拓扑绝缘体的分子束外延生长动力学，发展出严格控制材料组分的三温度法，生长出国际上质量最高的拓扑绝缘体样品。这种方法后来成为国际上通用的拓扑绝缘体样品制备方法。

随后，他们首次利用角分辨光电子能谱，绘制出三维拓扑绝缘体在二维极限下的电子能带结构演化。这项成果为基于拓扑绝缘体薄膜的大量后续工作打下了基础。他们利用低温强磁场扫描隧道显微镜技术，揭示出拓扑绝缘体表面态的拓扑保护性和朗道量子化等独特性质，在国际上产生了很大的学术影响。这一系列努力与成果，使我国在拓扑绝缘体领域跻身国际领先行列。

2009年，薛其坤团队与来自清华大学、中国科学院物理研究所、美国斯坦福大学的合作者们，基于所获得的高质量拓扑绝缘体薄膜，开始对量子反常霍尔效应进行实验攻关。

攻关过程极为艰辛，面临学术、技术以及路线等众多复杂的问题。薛其坤介绍说，制备厚度约5纳米的薄膜并不难，难的是要在原子尺度上控制掺杂的元素，更难的是要



上图：薛其坤院士在实验室指导学生们。

在电子层次上把结构、材料和物理性质之间的内在关联理解清楚，为下一个实验寻找方向。

“每个样品从生长到测量，至少需要三四天时间。”薛其坤说，“大家把能力发挥到了极致，他们付出的努力令人惊讶。”即便如此努力，在2012年初，实验工作还是遇到了瓶颈。“所有需要的条件我们似乎都已经达到了，但是得到的结果离最终的成功还很遥远。”团队成员、清华大学物理系教授何珂回忆说。

薛其坤并不认为这是失败。“在实验上，如果我们达不到目标，说明我们的学术判断不一定正确，这是一个提高学术能力的机会。在科学探索中，把不通的路找出来也是贡献。”他说。

在他的鼓励和开导下，大家重新静下心来，并决定转变思路，做“减法”，逐一排除样品中可能存在的各种问题。在一步步尝试与优化后，2012年12月，薛其坤团队终于制备出世界上首个具有铁磁性、绝缘以及有拓扑特性的新奇物理性质材料的薄

膜，首次在实验室找到了这个“宝藏”。

2013年3月，这一突破性成果发表在了《科学》杂志上，引起了国际物理学界的广泛关注。如今，量子反常霍尔效应已经成为国际物理学发展最快的研究方向之一。薛其坤团队也在相关研究中不断取得新成果，继续引领着该方向的国际学术进展。他们与合作者在2018年首次发现一种内禀磁性拓扑绝缘体MnBi₂Te₄，这种材料具有规则排列的磁性原子和巨大的磁能隙，有可能实现更高工作温度的量子反常霍尔效应，从而使其能在电子器件中应用。这一发现开启了国际上一个新的热点研究方向，近年已有科学家基于该材料，在30K温度观测到磁场辅助下量子反常霍尔态存在的证据，进一步增大了基于此材料实现高温量子反常霍尔效应的希望。

“我们还要提高量子反常霍尔效应的观察温度，寻找更便宜的材料，使它尽快应用到实际中去。这是我们正在努力的方向。”薛其坤说。

在演讲的互动环节，中国科学