

早在 1980 年，整数量子霍尔效应就被发现，两年后，人们又发现了分数量子霍尔效应，发现它们的科学家已分别获得 1985 年和 1998 年诺贝尔物理学奖。这两种“正常”的霍尔效应，其产生需要强达 10 万高斯的外加磁场，而地球上的自然磁场强度不过才 0.5 高斯。

常态下，芯片中的电子运动杂乱无章，经常相互碰撞，发生热量损耗，让计算机芯片的速度难以进一步提高。而量子霍尔态下，电子各行其道，永不混杂，遇到杂质，自动绕行。由于运行中电子几乎不碰撞，如用量子霍尔效应设计电子线路，电子产品就不会发热，能耗极低。“这相当于混乱的农贸市场和顺畅的高速公路的区别。”清华大学教授薛其坤院士表示，量子霍尔效应在开启下一轮信息革命上会有很大作用。但过去发现的整数和分数量子霍尔效应，需外加一人高电冰箱那么大的一块磁体，以产生外加磁场，基本不实用。

人们推测，量子世界中应该也有无需外加磁场的“反常”霍尔效应存在。但如何观测到这个“反常”的奇迹，却成为一个世纪难题。

“发现量子反常霍尔效应，需要解决两个问题。”中科院物理所研究员方忠说，“一是反常霍尔效应能否量子化？二是如何实现反常霍尔效应的量子化？”

方忠等人 2003 年发表于《科学》杂志的论文回答了第一个问题，他们通过详细计算表明：在许多材料中反常霍尔效应主要是体系的电子结构本身导致的，而不是杂质效应。这说明在特定的条件下反常霍尔效应能够实现量子化。

如何实现反常霍尔效应？这需要材料本身既具备磁性又是绝缘体。由于磁体通常为导体，这是一个自相矛盾的要求。好在不久之后，一种新材料——拓扑绝缘体的出现，让这个要求有了实现的可能。

拓扑绝缘体是一种量子物态的新型固体材料：内部是绝缘体，界面则是允许电荷移动的导体。给绝缘体表面镀上一层金属，貌似也能实现这种功能。然而，镀金层磨损后，绝缘体就不能导电了。拓扑绝缘体的神奇之处却在于，就算磨掉表层，它也能让新露出来的内层体现出表层特质，总是保持界面导电且内部绝缘的性质不变。

2006 年，斯坦福大学教授张首晟提出拓扑绝缘体理论的材料实现方案；次年，这个预言在他与德国维尔茨堡大学的实验中得到证实。拓扑绝缘体的发现引起了科学界的轰动和研究热潮。张首晟在拓扑绝缘体发现后不久，就通过与中科院物理所和清华大学的合作，把拓扑绝缘体研究带到了中国。

2008年张首晟研究组率先提出，如果在拓扑绝缘体薄膜如 HgTe 中引入铁磁性，可以实现科学界期待已久的量子反常霍尔效应。

如何在具体的拓扑绝缘体材料中实现这一方案，成为接下来的关键问题。为攻克这一难题，张首晟领导的斯坦福大学研究组和中科院物理所方忠、戴希领导的研究组开始了几年的合作。在经过了数次尝试以后，2010年，戴希、方忠等人与张首晟合作，在《科学》杂志上发表论文指出，在碲化铋（ Bi_2Te_3 ）、硒化铋（ Bi_2Se_3 ）中掺入铬（Cr）、铁（Fe）后，将自发形成铁磁态，同时还能保持体系本身的拓扑特性，这将成为实现量子反常霍尔效应的最佳体系。

一千个和三个

这个理论方案被《科学》审稿人评价为非常具有“挑逗性”，意即诱惑性很强，但实现难度也高到离谱。“当时觉得理论工作被接受后可以歇口气，因为我也不能肯定有生之年能否看到它的实现。”戴希说。

论文发表后，德、日、美等国的相关科研小组也抵挡不住诱惑，开始了对这个方案的实验研究。

就理论而言，这是一个美妙的提案，对实验来说，却有十分苛刻的要求。

实验要求做出高纯度的单晶材料，一百万个原子中最多只能允许出现一个杂质。实验要求做出极其平整的拓扑绝缘体，一纳米等于百万分之一毫米，材料只能是5纳米厚，表面凹凸1纳米都不行。一般而言，包含2种元素的拓扑绝缘体就很难做到这种纯度和精度了，这个实验最终成功所用的材料包含铬、铋、锑、碲4种元素，所以其难度是翻倍再翻倍。

显然，这样的实验需要极其精密的材料生长控制技术。好在我们有现成的技术储备。2002年初，薛其坤等人曾开创过一个融合三种实验设备的联合系统：用分子束外延设备将材料生长控制在原子水平，用扫描隧道显微镜让形貌标准达到原子水平，用角分辨光电子能谱让能带结构达到原子水平。这种联合实验系统的发展和熟练运用，对拓扑绝缘体材料的精密控制起到重要作用。

有了神兵利器，还要艰苦卓绝的努力。对实验物理学家来说，材料的生长制备与其说是一种技术，毋宁说是一种艺术。中科院物理所副研究员何珂说，同样的材料，换台机器、换个人就可能做不出来，极其考验人的实验技术水平与耐心。“四种元素在一起，要很耐心地配比，需要非常细心

的工作。根据测量结果猜测调整配方，有时还要凭直觉。日本、美国的研究团队跟我们同期开始这个研究，现在研究数据跟我们差远了，主要就差在材料生长上。”

薛其坤看到最终成功的材料的复杂分子式时就倒吸了一口凉气：“我做了20多年的分子束生长，看到这么复杂的分子式我也不敢说能做成。”

为做出这个材料，从2009年起，他们摸索了整整4年。“理论工作预言了三种材料，具体哪种能成功，我们也不知道，只能一样样试。”中科院研究员马旭村说，实验组总共做了超过一千次磁性掺杂的样品测量，在生长阶段就失败而没拿去测量的样品，则根本没人统计过。“有多个设备同时进行，顺利的时候一周能做出5块样品，不顺利的时候一个月也做不出一块。”

研究者们先使用加法，把所有手段一个一个加进去，让实验数据不断接近最终目标。但到了2012年时，他们把所有手段用完了，却距离最终目标还差一截。实验停滞了，大家一起开会讨论，决定开始用减法，把可能出现问题的地方一个个排除掉，最后发现了覆盖层因素。

何珂说：“原来我们总要盖一个保护层，把拓扑绝缘体薄膜保护起来。采用减法后，我们发现了三块效果最好的样品，分析了一下，三块样品都没覆盖层。”

不盖，本来是想做个比较，却让研究者发现了惯性思维的误区。一千多块送去测试的样品中，这三块“裸奔”的样品成为最后的胜利者。

成功在绝对零度

量子反常霍尔效应实验的成功标志是，在零磁场中，让拓扑绝缘体材料的霍尔电阻跳变到25800欧姆的量子值。

清华大学的王亚愚实验组就负责这项测量和分析工作。

最开始他们压根测不到电阻。“2010年2~4月根本测不到电阻，样品非常导电。”

然后他们测到了一点点电阻。“2010年5月，测到小于10欧姆的电阻。”

接着是几个月停滞后的一点小进步。“2010年10月，40欧姆；11月，80欧姆。”

此后是几乎让人绝望的两次停滞。“过程很乏味，特别有将近一年时间在停滞状态，做数据测量的学生每次测的数据都一样，快崩溃了。”

改变样品配方，调低实验温度。2011年6月和2012年3月各出现一次突破，前一次电阻达到数千欧姆，后一次电阻达到1.5万欧姆。

似乎胜利在望，却又停滞不前。这时，减法发生了作用，三个“裸奔”样品得到更好的结果——2012年10月，1.7万欧姆。

他们发现，低温下得到的数据更佳，但王亚愚实验组的检测设备已调到极限——绝对零度是负273.15℃，这套设备只能让样品的电子温度降低到1.5K，也就是比绝对零度高1.5摄氏度的位置。由于电子的性质十分活跃，让电子温度降低，是比让整个材料温度降低要困难得多的事情。

于是，中科院物理所的吕力实验组在最后阶段加入进来。他们实验室自己组装的核绝热去磁与电子冷却系统，能将电子温度降低到4mK（比绝对零度高0.004摄氏度），这是国际上的最好纪录，华裔诺贝尔物理奖获得者崔琦就曾将样品拿到这里来测量。

吕力实验组停下自己手头的其他实验，开始检测拓扑绝缘体的量子反常霍尔效应。2012年10月，90mK下，测到电阻为2.5万欧姆；12月，30mK（比绝对零度高0.03摄氏度）下，测到电阻为25800欧姆。

大功告成。

“数据完美得我们都不敢相信。”薛其坤说，如果以时间为横轴，进展为竖轴，把实验中的突破点和停滞期连成线，可以看到明显的一级一级的台阶，就像量子霍尔效应的图示一样。“这是一个美丽的巧合。”

自由探索的硕果

这是一个集体攻关的项目。

在3月14日发表的论文中，有23名作者。包括四个实验组中参与此项研究的师生，也包括此前作出过理论预言的张首晟等理论物理学家。

“团队中有世界上最好的学生，我们跟学生一块成长。”清华大学教授王亚愚感慨地说，“工作最终成功，是因为学生们工作非常勤奋，思维没有束缚，能迸发出让老师惊喜的想法，并一点点把想法实现。”

“我们这个团队像个串联电路，拿走任何一个电阻，电路就不通了。每个人都是不可或缺的。”戴希的比喻得到了每一个实验组成员的赞同。

薛其坤实验组的丰富经验、马旭村实验组的精湛技艺、王亚愚实验组的柳暗花明、吕力实验组的极限低温，都是实验成功的关键因素。少了一个，量子反常霍尔效应这颗明珠，都不会这么快落到中国科学家的囊中。

这也是一个自由探索的项目。

与此前那些获得重大突破的项目不同，这一次，科学家们并没有拿“量子反常霍尔效应”作为一个明确的重大项目来填报课题、申请经费、建一个大项目组，而是在各自的研究中，因为对量子反常霍尔效应的兴趣，自然形成了合作团队。清华大学和中科院物理所在地理上比邻，集中了这个领域中各个方向的顶尖人才，实验合作可以做到亲如一家，个人发展又可以各有侧重，研究者们抬抬腿就可以聚到一起开会，有什么问题和困难随时都可以集思广益。

这样的自由探索让科学家们享受到科研本身的乐趣，并将这种乐趣作为科研工作的最大动力。正如吕力所说：“很多科学研究都是非常难的，我们一天到晚跟自己较劲。科研有挑战性，越难越有成就感。”

获得巨大成功后，这种探索还将继续。因为我们只摆脱了磁场，却没有摆脱低温。

由于此次发现的量子反常霍尔效应是在接近绝对零度的极低温下产生，这种实验室成果离实际应用还相距较远。要将量子反常霍尔效应用于个人电脑，需要寻找更便宜的材料，并在常温下实现这一效应。因此，新的材料，和更高一些的实验温度，是实验团队的科学家们下一步将要努力的方向。

对于这一点，理论物理学家们显然更为乐观。

“绝缘体可以在常温下出现，磁体可以在常温下出现，没理由拓扑绝缘体一定要在极低温下出现。应该在理论上先预言，寻找方向。”张首晟断言，“温度提高的过程肯定会比超导容易。要追求的下一个目标，是在室温下实现量子反常霍尔效应。这可能需要更换材料配方，可能需要较重的元素。”

显然，这场量子世界“反常”奇迹的追踪还远未结束。



余惠敏

《经济日报》科技新闻部记者，中经自主创新研究室副主任。曾获第十八届中国新闻奖二等奖，第十二届“科星新闻奖”一等奖，2013年全国青年岗位能手，2013年度“科技好新闻”（科技部）等奖项。



余惠敏在西昌卫星发射中心测试站采访



2013年8月余惠敏在中国科学院过程与控制研究所采访