

清华薛其坤领衔实验攻克量子世界制高点

○ 清华大学新闻中心记者 顾淑霞 刘蔚如

2013年3月18日，在规模宏大的美国物理学会年会上，清华大学薛其坤院士成为焦点人物——很多华人科学家和相熟的外国学者纷纷向他表示祝贺。在此三天前，由薛其坤领衔、清华大学物理系和中科院物理所联合组成的实验团队在《科学》杂志在线发文，首次在实验上发现量子反常霍尔效应，这意味着量子霍尔效应物理领域一个期待已久的重要现象已经被中国科学家率先观测到。

4月10日，诺贝尔物理学奖得主、清华大学高等研究院名誉院长杨振宁表示：“这是第一次从中国实验室里发表的诺贝尔奖级的物理学论文。”

量子霍尔效应在凝聚态物理中占据着极其重要的地位。整数量子霍尔效应和分数量子霍尔效应的实验发现分别于1985年和1998年获得诺贝尔物理学奖。这次中国科学家们首次在实验上观测到的量子反常霍尔效应，被认为可能是量子霍尔效应家族最后一个有待实验发现的成员。为了实现这一基础科学领域的重大突破，他们的团队花了整整四年时间。

科学家敏锐眼光锁定至高目标

量子反常霍尔效应是一个全新的量子效应，由于其存在不需要外加磁场，因此更具应用前景，成为世界凝聚态物理学家关注的焦点。

2008年10月15日，薛其坤清楚地记得这个日子。在课题组例行的组会上，一名学生在做文献交流时介绍了拓扑绝缘体的概念以及相关研究成果。从此，“拓扑绝缘体”走入了薛其坤的视野。拓扑绝缘体这个凝聚态物理中的新领域是由斯坦福大学的张首晟教授与来自美国和德国的另外两位科学家共同开创的。张首晟和薛其坤之间的深厚友谊和密切交流使他们意识到，这是一个非常值得深入探究的领域。从那时起，他们就展开了对拓扑绝缘体中新奇量子效应的实验研究。在一年多的时间内，他们与清华大学物理系陈曦和贾金锋教授，以及中科院物理所马旭村研究员合作，在拓扑绝缘体的样品生长和原位电子态研究方面取得了一系列举世瞩目的成果。此后，他们瞄准了更高更难的目标：在实验上实现量子反常霍尔效应，也就是零磁场中的量子霍尔效应。

量子反常霍尔效应是一个全新的量子效应，由于其存在不需要外加磁场，因此应用方面比此前发现的量子霍尔效应要方便得多，可以推动新一代的低能耗晶体管和电子学器件的发展，解决电脑发热等问题。因此从理论研究和实验上实现量子反常霍尔效应，成为世界凝聚态物理学家关注的焦点。

2006年，张首晟和他的学生们成功地预言了第一个拓扑绝缘体，一年之后，这个奇妙的预言就被实验证实了。从此拓扑绝缘体这个领域就在全球范围内蓬勃发展，成为凝聚态物理和材料科学研究中的主要方向。由于开创拓扑绝缘体这个领域的杰出贡献，张首晟于2010年获“欧洲物理奖”，2012年获美国物理学会“奥利弗·巴克利奖”（Oliver Buckley），这是凝聚态物理领域的最高奖。

2012年他又获得国际理论物理学最高奖“狄拉克奖”。2013年3月20日，“基础物理学奖”颁奖盛典在瑞士日内瓦举行，该奖被学界称为科学界的奥斯卡奖，授奖于著名理论物理学家霍金，并将物理学前沿奖授予张首晟和他的同事们，表彰他们开创拓扑绝缘体领域的杰出贡献。2009年，张首晟入选我国“千人计划”，成为清华大学高等研究院特聘教授，从此，他立志于将拓扑绝缘体这个蓬勃发展的领域带入中国，并与薛其坤开展了紧密合作。

当时拓扑绝缘体是建立在时间反演对称性的原理上，2008年，张首晟和清华大学高等研究院博士生祁晓亮提出，当时间反演对称性被磁性破坏后，会出现奇妙的量子反常霍尔效应，从此，磁性拓扑绝缘体便成为实现量子反常霍尔效应的理想系统。2008年，清华大学博士生刘朝星和祁晓亮在张首晟及中科院物理所研究员方忠和戴希的大力支持下，提出了二维磁性拓扑绝缘体实现量子反常霍尔效应的基本机理。自旋能带的反带原理深刻影响了量子反常霍尔效应的理论研究。2009年，张首晟和他的博士生们提出了Bi₂Se₃，Bi₂Te₃，Sb₂Te₃掺入3d磁性元素，实现磁性拓扑绝缘体的方案，并做了具体的解析计算。该文章发表在《自然》杂志物理分刊上。五个月后，张首晟又与中科院物理所方忠、戴希开展了紧密合



张首晟在量子反常霍尔效应实验成果新闻发布会上发言

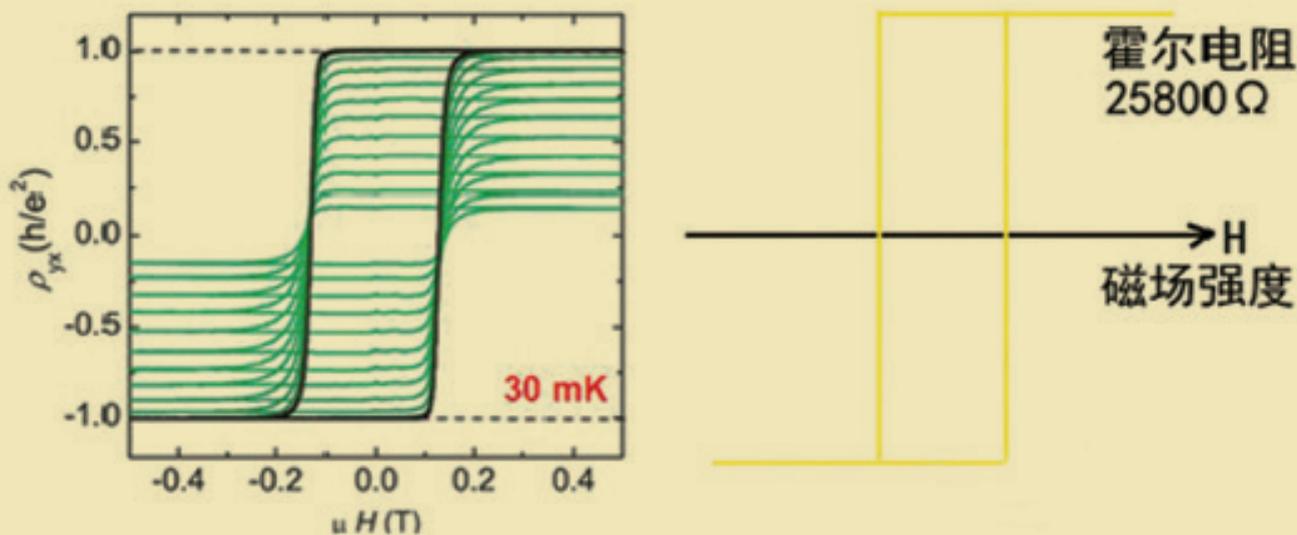
作，通过第一性原理的数值计算，认证了该系统乃是磁性拓扑绝缘体，是实现量子反常霍尔效应的理想材料。该文章发表在《科学》杂志上，引起了国内外实验物理学家的广泛关注。从此，一场轰轰烈烈的国际竞赛开始了。

量子反常霍尔效应意味着在零磁场中，霍尔电阻跳变到约25800欧姆的量子电阻值。要实现这一不可思议的量子现象，所需要的实验材料必须同时满足三项非常苛刻的条件：材料的能带结构必须具有拓扑特性，从而具有导电的一维边缘态；材料必须具有长程铁磁序，从而存在反常霍尔效应；材料的体内必须为绝缘态，从而对导电没有任何贡献。这就如同要求一个人同时具有短跑运动员的速度、篮球运动员的高度和体操运动员的灵巧，其难度可想而知。在实际的实验材料中要同时满足这三点对实验物理学家来讲是一个巨大的挑战，美国、德国、日本等国

的一流科学家由于无法在材料中同时满足这三点，而未取得最后的成功。

为了在激烈的国际竞争中脱颖而出，薛其坤对团队成员进行了合理分工。由于高质量的材料是实现这一量子效应的关键，薛其坤亲自担任样品生长的总负责，并指定马旭村研究组的何珂带领几位研究生具体进行。反常霍尔效应测量则由清华大学物理系教授王亚愚负责。当时何珂刚刚加入中科院物理所开始工作，王亚愚在清华的运输实验室也才搭建调试完不久。两个年轻人对于能够负责这样重大的研究课题感到非常兴奋，然而在研究中遇到的挑战也给他们带来很大压力。“最开始的时候不要说量子化的反常霍尔效应，就连这些材料在离开超高真空的生长环境后，能否获得可靠的运输数据，我们都没有把握。”王亚愚说。“很长时间没有什么好结果，我们都不太好意思见薛老

量子反常霍尔效应



右图为理想情况下量子反常霍尔效应的行为，左图为实验测量到的数据，二者吻合得非常完美

师。”何珂回忆说。然而，正是薛其坤团队在高质量样品生长方面的深厚基础，特别是薛其坤本人在样品生长关键技术方面的具体指导，使得他们在建立拓扑绝缘体生长动力学的过程中，最终克服了重重困难。

材料生长动力学奠定研究基础

薛其坤团队在国际上率先建立了拓扑绝缘体薄膜的分子束外延生长动力学，并长出了高质量的薄膜。从这一天起，他们就在世界上领先，并且一直将这个优势保持下去，直至最终得到完美的实验结果。

在拓扑绝缘体研究初期，薛其坤就敏锐地意识到，拓扑绝缘体材料的生长动力学与自己长期从事的砷化镓研究有非常类似的地方。于是，他迅速制定了实验方案——按照生长砷化镓的方法进行实验，首先建立起拓扑绝缘体材料的生长动力学。“实验转到这个方向之后，就进入了我们比较擅长的领域。”薛其坤说。

材料的生长动力学描述的是如何从一个原子的反应最后形成一个宏观样品的过程。只有掌握了材料的生长动力学，才能精确地控制材料的生长。从1992年攻读博士学位起，薛其坤就一直从事薄膜生长动力学的系统研究，至今已经累积了20余年的经验，之前也已获得两项国家自然科学二等奖。

在薛其坤的亲自指导下，团队仅仅用三四个月的时间，就在国际上率先建立了拓扑绝缘体薄膜的分子束外延生长动力学，实现了对样品生长过程在原子水平上的精确控制，使得薄膜样品的质量很快达到了国际领先水平。“这是最重要的一步，迈出了这一步，后面的工作才能顺利展开。”薛其坤强调说，“可以说，从建立起这类材料的生长动力学的这一天起，我们就奠定了在这项研究中的领先地位。”三维拓扑绝缘体的理论预言和高质量拓扑绝缘体薄膜的分子束外延生长动力学及电子态研究等系列成果在国际



薛其坤

材料物理专家。现任清华大学校长助理、科研院院长，中国科学院物理研究所研究员。1984年毕业于山东大学光学系，1990年、1994年先后获中国科学院物理研究所硕士、博士学位。2005年当选为中国科学院院士。主要研究方向为扫描隧道显微学、表面物理、自旋电子学、拓扑绝缘量子态和低维超导电性等。

学术界引起了广泛影响，并以总选票排名第一的成绩入选“2010年度中国科学十大进展”。此外，团队成员还获得了“求是基金会”的“求是杰出科学家奖”和“求是杰出科技成就集体奖”。

恰好在这个关键时刻，中国开始实施旨在吸引海外顶尖学者的“千人计划”。张首晟作为“千人计划”学者受聘清华大学，自此与薛其坤团队开始了紧密的合作研究。他们决定把研究的重点放在量子反常霍尔效应上，因为这无疑是拓扑绝缘体领域最具影响力的工作。张首晟深厚的学术造诣、活跃的学术思想和坚定执着的学术态度为整个项目的顺利实施起到了非常重要的作用。



杨振宁在量子反常霍尔效应实验成果新闻发布会上讲话（王皓冉摄）

紧密合作追求极致通往成功

面对高难度的实验，力求完美、追求极致的科学精神和紧密的团队合作让他们跨越重重障碍，靠近胜利的彼岸。

虽然材料生长动力学这一关键问题得以解决，但这并不意味着接下来的工作就是一片坦途。毫不例外的，实现量子反常霍尔效应所需的三个苛刻条件带来的种种难题他们也都遇到了。比如即使是高质量的拓扑绝缘体薄膜也很难做到真正绝缘，在拓扑绝缘体材料中实现自发铁磁序也非常困难。

实验面临的瓶颈数次让整个团队感觉举步维艰。然而他们没有放弃，而是选择独辟蹊径，最终找到了一条非常合理的技术路线，这在很大程度上得益于样品生长和输运测量研究组的紧密合作。团队成员几乎每天都通过邮件和电话交流实验结果，每2~3周都会进行一次充分讨论，分析实验的所有细节，并制定下一步的详尽计划。“我们这些有不同专长、不同性格、不同思路的研究人员为了一个共同的目标而努力，互相交流、互相促进是取得成功的关键。如果我们都是相似的人，反而可能无法取得这样的成就。”何珂说。

“我们很幸运有一批优秀的研究生。”

王亚愚说，“他们不仅工作勤奋，而且由于思维没有束缚，在研究过程中经常会提出一些让老师惊讶的奇思妙想。比如能带结构工程、栅极电压调制、衬底制备、表面覆盖层的选择、微小器件的加工等实验的关键步骤都是学生们在具体工作和相互讨论的过程中摸索出来的。我们和学生们是一起成长的。”王亚愚说。

薛其坤和张首晟等资深科学家在关键步骤上的敏锐直觉和精准判断以及他们积极、自信、乐观的态度也给予团队成员很大鼓励。曾经有一段时间，年轻的博士生们甚至觉得实验没有任何希望。作为团队的领军人物，薛其坤看到了这一切。他把大家召集在一起，一番热情洋溢的讲话之后，有位博士生形容自己感觉“浑身发热”，干劲十足。此外，团队成员也与方忠、戴希、刘朝星、祁晓亮、段文晖、朱邦芬等理论学者开展了紧密而愉快的合作，加快了实验研究的进程。

在过去四年里，团队成员共生长和测量了超过1000个样品，并通过一次次的生长、测量、反馈、调整，争取每一步都做到极致。功夫不负有心人，每6~9个月，他们就会克服一个困难，一个个激动人心的成果接踵而来。

2010年，他们完成了对1纳米到6纳米（头发丝粗细的万分之一）厚度薄膜的生长和输运测量，得到了系统的结果，从而使得准二维拓扑绝缘体的制备和输运测量成为可能。

2011年，他们实现了对拓扑绝缘体能带结构的精密调控，使其成为真正的绝缘体，去除了体内电子对输运性质的影响。

2011年底，他们在准二维、体绝缘的拓扑绝缘体中实现了自发长程铁磁性，并利用外加栅极电压对其电子结构进行了原位精密调控。

就这样，量子反常霍尔效应所需要实验材料的三个苛刻条件终于实现了！

2012年3月，团队成员不经意间观察到反

常霍尔电阻值竟达到了量子电阻的0.6倍，似乎离量子电阻咫尺之遥，这给了他们极大的鼓舞，成功只有一步之遥了！此后，他们从各个细节全面优化生长测量条件，一步一步接近奇迹出现的时刻。

四年努力见证奇迹的时刻

团队成员利用分子束外延生长了高质量的磁性掺杂拓扑绝缘体薄膜，并在极低温下对其磁阻和霍尔效应进行了精密测量。他们发现在一定的栅极电压范围内，材料在零磁场中的反常霍尔电阻达到量子电阻的数值并形成平台，同时纵向电阻急剧降低并趋近于零，这是量子化反常霍尔效应的特征性行为。

2012年10月的一个晚上，薛其坤收到学生的短信：他们在实验中发现了量子反常霍尔效应的迹象！回忆起那一刻，薛其坤依然清晰记得当时的激动。当晚薛其坤立即组织团队人员，设计出几套方案，部署好了下一步的实验，特别是和中科院物理所吕力研究组合作，将实验推进到接近绝对零度的极低温。

接下来的几天里，团队成员们用“诚惶诚恐”形容自己的心情。严谨的科学精神告诉他们，一次的结果并不能说明问题，他们需要用不同的样品多次重复实验。25800欧姆，所有人都在期待这个标志性的数值，然而没有人知道神秘的微观世界究竟会发生什么。之前一直没有做到25800这个数值，但是现在如果超过了怎么办？

数据不停地跳动着，10000、20000、25800！数据停住了！材料在零磁场中的反常霍尔电阻达到量子电阻 ($h/e^2 \sim 25800$ 欧姆) 的数值并形成平台，同时纵向电阻急剧降低并趋近于零，这是量子化反常霍尔效应的特征性行为！历史将这一时刻定格，在美国物理学家霍尔于1880年发现反常霍尔效应133年后，人类终于实现了其量子化！实验结果如此干净漂亮，数据完美得不可思议，每位成员都在由衷地感叹：“这真是见证奇迹的时刻！”

得出最终数据的那天，薛其坤带了两瓶香槟酒，团队成员一起合影，留下珍贵的回忆。那一

夜，距离2008年10月已是整整四年。四年里，无数个不眠之夜，功夫终不负有心人。

中国优秀科研团队向世界“亮剑”

量子反常霍尔效应这个重大的科学发现证明，中国科学家的科学素养、研究水平和对实验技术的掌握，已经与国际先进水平接轨。在中国加大投入基础科学研究20年后，中国科学界已经具备一批国际水平的科学家向世界科学领域“亮剑”。

薛其坤强调，真正的科学发现是为人类增加新知识，所以研究需要很长的过程，需要多年专业的训练和积累，也需要一批经过严格训练的专业选手来攻关。“在原子的尺度上控制薄膜的生长，我们有20年的经验积累，厚积薄发，才能迈出量子反常霍尔效应实验最核心的一步。”他说。

“重大实验发现是对人类智慧的一个巨大挑战，这对研究团队的科研素养和积累，以及实验技术水平的要求都非常高。我们的团队成员在各自的领域都是一流的‘专业选手’，我们的研究团队具备了国际领先水平。”薛其坤说。他强调，这在很大程度上得益于最近20年中国对基础研究的重视和大力投入。2005年~2007年，时任清华大学物理系主任的朱邦芬院士先后引进薛其坤、陈曦和王亚愚三位实验物理学家，并通过各种途径给他们创造良好的工作条件。中科院物理所也为马旭村领导的表面物理研究组和吕力领导的极低温输运研究组提供了大力支持。科学家们每个人都在各自的领域做到了世界领先水平，并紧密合作，最终做出了量子反常霍尔效应这样的重大科学发现。

“这项成果是我们团队精诚合作、联合攻关的共同成果，是中国科学家的集体荣誉。”薛其坤、张首晟、方忠等都着重强调这一点。

现在，这个诞生于中国本土的优秀科研团队仍然在为量子反常霍尔效应的应用前景奋斗着。薛其坤表示：“任何一个现象从原理性的发现走到应用，都需要不同领域科学家和工业界的共同努力，我们也会与更多的人合作，努力将这个领域发扬光大，不断推动它向应用方向发展。”

(转载自清华新闻网)