

## 人物简介



新华社发

薛其坤,1963年生,清华大学教授、中国科学院院士。南方科技大学党委副书记、校长,北京量子信息科学研究院院长,粤港澳大湾区量子科学中心主任。

薛其坤是凝聚态物理领域著名科学家,取得多项引领性的重要科学突破。他率领团队首次实验观测到量子反常霍尔效应,在国际上产生重大学术影响;在异质结体系中发现界面增强的高温超导电性,开启了国际高温超导领域的全新研究方向。

## 记者手记

## 薛其坤的幸福感

◎本报记者 付毅飞

夏日的清华大学校园,绿叶摇曳、光影交错,宁静中洋溢着青春的活力。

在李文正馆古籍阅览室,记者对面的薛其坤院士谦逊温和、话语诚恳。

“国家的强大,对一个科学家的事业来讲非常重要。”他说,“党和国家对科学家高度关心,给我们创造了这么好的环境,让我感觉当中国科学家是最幸福的。”

采访中,薛其坤经常提到自己的幸福。他的合作伙伴王亚愚教授也说:“我觉得薛老师在哪儿都会很幸福。”

在沂蒙山区长大的薛其坤,过过苦日子。后来他考入山东大学,度过了快乐的大学生活,又在曲阜师专教书,发了工资就去买好吃的。讲述这些故事时,他绘声绘色。

在中国科学院物理研究所读研,赴日本、美国学习和工作,让步入更高科学殿堂、接触到更先进科学技术的薛其坤越来越认识到,这来之不易的幸福值得珍惜。

于是,他每天花16个小时泡在实验室里,尽可能多学习知识、多掌握技术,只为心中愈发坚定的信念:多做点事,让国人更有尊严,让祖国更强大。

回国后,薛其坤乘上了国家快速发展的东风。在向科学前沿奋力攀登的同时,他也不断将自己的幸福感传递给身边的年轻人。

在学生面前,薛其坤平易近人,会把身段放得很低。他给学生们讲自己数学考试不及格、三次才考上研究生的经历,将自己当成一个“勤能补拙”的案例,鼓励学生珍惜当下环境。他总是提醒学生说:有这么好的条件,如果不集中精力做实验,不仅是浪费自己的时间,还是严重浪费科研资源。

量子反常霍尔效应研究取得的成功,让薛其坤感到幸福的同时更感欣慰:“这项成果的产生,应该是对国家、人民长期大力支持的回报。”

目前,薛其坤团队还在不断取得新成果,继续引领着相关领域的国际学术进展。他的使命尚未完结,他的幸福也将继续。

## 薛其坤：披荆斩棘叱咤量子竞技场

◎本报记者 付毅飞

进入信息时代,芯片已然成为处理信息的“大脑”。在指甲盖大小的芯片里封装数十亿个晶体管,堪称人类最复杂的壮举之一。可是,当数据量指数性爆发,仅凭集成更多晶体管不再“一招鲜”,元器件的发热问题成为限制算力提升的瓶颈。而量子反常霍尔效应,则提供了实现超高性能电子器件的可能性。

“超海量数据时代会对信息的存储和处理提出极高的要求,需要一种完全创新的计算机,实现类似于超导、电阻等于零的无能耗运输。”凝聚态物理学家、清华大学教授、中国科学院院士薛其坤说。

在材料中,电子的运动是高度无序的。电子和晶格振动、电子和杂质、电子和电子会不断碰撞,产生电阻、发热等效果。如果给薄膜材料外加一个强磁场,电子有可能立即“规矩”起来,沿着边界不受阻碍地运动,这种有趣的现象叫做量子霍尔效应。假如能找到一种特殊材料,既有自发磁化,电子态又具有拓扑结构,则有可能在不外加磁场的情况下产生量子霍尔效应。这就是量子反常霍尔效应。

多年来,量子反常霍尔效应如同一个传说中的“宝藏”,让各国物理学家魂牵梦绕,却没人能证明它真实存在。

经过数年探索,薛其坤团队通过分子束外延的办法,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”。

6月24日,薛其坤获得2023年度国家最高科学技术奖。

## 进入“没有赛道的竞技场”

1980年代,国际量子材料和物态领域基础研究迎来爆发式发展。整数和分数量子霍尔效应等多项发现,开启了拓扑量子物态这一新研究领域,并为发展低能耗电子器件带来了新的可能。

不过,量子霍尔效应的产生需要非常强的外加磁场,这对其研究和应用都带来了极大困难。试想一下,如果运行一枚具有量子霍尔效应的芯片,需要配备一台冰箱大小的强磁场发生器,谁能接受?

2016年诺贝尔物理学奖获得者霍尔丹(F. D. M. Haldane)于1988年提出,有可能存在不需要外加磁场的量子霍尔效应体系。但他的假设离实际材料体系相距甚远。此后20多年里,在真实材料中发现量子反常霍尔效应,一直是凝聚态物理学的重大科学目标之一。

2005年,拓扑绝缘体概念被提出,科学家认为,在拓扑绝缘体薄膜中引入铁磁性,理论上有可能实现量子反常霍尔效应。但要在实验中实现这一效应却极为困难。因为反常霍尔效应的量子化,需要材料的性质同时满足三项非常苛刻的条件:一是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,即一维导电通道;二是材料内必须具有长程铁磁序,从而无需借助外磁场而存在反常霍尔效应;三是材料体内必须为绝缘态,对导电没有任何贡献,只有一维边缘态参与导电。在实验中,想实现以上任何一点都很难,即使在理论上,能否同时满足这三个条件也存在很大不确定性。因此,有人将这项全球实验物理学家面临的巨大挑战,形容为“没有赛道的竞技场”。

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Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>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法,生长出国际上质量最高的拓扑绝缘体样品。该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。

在此基础上,薛其坤将目光投向了量子反常霍尔效应。“对于科学家来讲,这是一个非常奇妙的物理现象,我们很希望把这个谜揭开,看看它到底是不是存在。而且,在国家支持下,我们的相关实验技术也达到了这个水平。”他说,“正可谓天时地利人和。”

2009年,薛其坤带领量子反常霍尔效应实验团队,进入了“没有赛道的竞技场”。

## 一条保存了12年的短信

“当年薛老师找到我和几位老师,说国际上有理论预言,可以在磁性拓扑绝缘体中寻找量子反常霍尔效应,并邀请我们一起攻关来发现这个效应。”清华大学物理系教授王亚愚回忆,自己当时立即被吸引了。

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

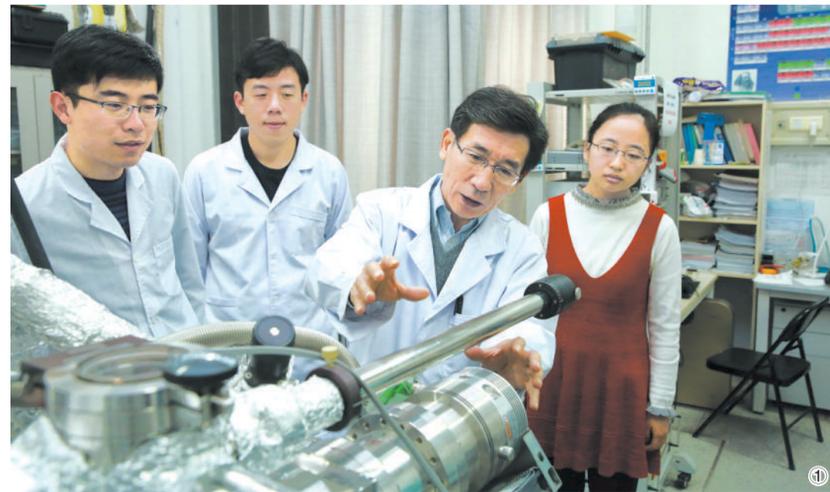
纳米的薄膜并不难,难的是要在原子尺度上控制掺杂的元素,更难的是要在电子层次上把结构、材料和物理性质之间的内在关联理解清楚,为下一个实验寻找方向。

在不断摸索中,研究团队制备出组分、厚度均精确可控的三元拓扑绝缘体薄膜,实现通过薄膜化学组分比例和电场效应,调控拓扑表面态的能带结构和薄膜的载流子类型与浓度。他们通过在该薄膜中掺杂磁性铬原子,在其中建立了铁磁序,以及垂直于薄膜面的易磁化轴。据统计,他们共制备了1000多个样品,最终获得的材料可以兼具铁磁性、绝缘性和拓扑性,是实现量子反常霍尔效应的理想材料系统。“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。”

2012年初,工作遇到瓶颈。“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。

在他的鼓励和指导下,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各种问题的。



图① 2017年10月,清华大学低维量子物理国家重点实验室,薛其坤(左三)与学生讨论实验工作。 苑洁摄

图② 薛其坤(左一)在日本求学期间与导师櫻井教授合影。 受访者供图

图③ 薛其坤(左)与大学同学合影。 受访者供图



薛其坤的手机里,至今保留着一条2012年10月12日收到的短信。

那是一个周五。当晚值班的项目组成员常翠祖,看到了量子反常霍尔效应初步迹象,于是迅速给薛其坤发了短信。“那天我回家早一点,大概十点半左右,刚停下车就收到消息。”薛其坤对此记忆犹新,“当时非常激动,也很欣慰。”

“最初决定做这项实验的时候,其实我们有思想准备,也许我们努力之后发现量子反常霍尔效应并不存在。”薛其坤说,“最终我们在基础研究中发现了这一科学规律。对于科学家来讲,这是一种莫大的幸福。”

## 努力推动成果应用

量子反常霍尔效应是新中国成立以来我国物理学界发现的重要科学效应之一,是中国物理学界对世界物理学发展作出的一项重大贡献。

“这个成果的产生,应该是对国家、人民长期大力支持的回报。”薛其坤表示。

成果发表后,产生了巨大的国际学术影响,得到了杨振宁等著名物理学家的高度评价。薛其坤于2014年、2022年两次受邀在由诺贝尔基金会发起的诺贝尔论坛作特邀报告,还在2014年国际分子束外延大会、2014年国际半导体物理大会等相关领域最有影响力的国际会议上作大会特邀报告。

该成果也推动了相关研究的快速发展。此后数年间,各国研究者通过对磁性拓扑绝缘体材料性质的改进,将量子反常霍尔效应的实现温度从0.03开尔文(K)提升到1开尔文以上。美国、日本、德国等国的国家计量机构均开展了基于量子反常霍尔效应的电阻量子标准研究,量子反常霍尔电阻的精确度已初步满足应用于电阻量子标准的条件。量子反常霍尔效应还在超冷原子系统、内禀磁性拓扑绝缘体系统、转角石墨烯、转角过渡金属硫化物系统中被观测到。如今,量子反常霍尔效应相关研究已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MnBi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>,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。

## 山区走出的战略科学家

薛其坤曾自比为“一艘从沂蒙山区驶出的小船”。

1980年,他离开老家山东省临沂市蒙阴县,考入山东大学光学系。他自我评价说,自己当时“不算特别努力,中规中矩完成了学业”。毕业那年,他没考上研究生,工作两年后又考,再次落榜。1987年,他考入中国科学院物理研究所,开始了研



究生学习。5年后,在导师陆华的帮助下,他作为中日联合培养博士生,前往日本东北大学金属材料研究所学习。

在日本的学习,给薛其坤带来了两大影响。一是使他养成了“7-11”工作习惯。他回忆说:“在此期间,我第一次接触到世界上最先进的实验技术和国际开放的环境。这是非常难得的机遇,我很珍惜。因此每天早上7点到实验室,晚上11点离开,以求用更长的工作时间尽可能掌握更多实验技术。”二是他逐渐养成了极为严谨的实验科学研究态度。

1994年,薛其坤回国完成答辩,在中国科学院物理研究所获得博士学位,随后继续赴日本东北大学工作,并作为访问学者,在美国北卡罗纳州立大学物理系做了一年的博士后。1999年,他回国,在中国科学院物理研究所担任研究员。2005年起,他任清华大学物理系教授。

“在国外7年多时间,我看到了国家在科学研究上,国人在生活水平上,跟发达国家的巨大差距。”薛其坤说,“这种经历坚定了我想为国家多做点事的信念。我希望祖国在科技各个方面都变得强大,希望中国人活得更幸福、更有尊严。”

带着这份信念,薛其坤投身于祖国科研事业,每天早上7点到实验室,晚上11点离开。常有学生想跟他比比谁能更早到、更晚离开实验室,但没人能像他那样多年如一日地坚持。

如今,他已成为我国在量子科技领域的杰出战略科学家。除了量子反常霍尔效应,他还带领团队发现界面增强高温超导,实现高温超导领域的重要突破,在国际上开辟了高温超导的全新研究方向。

在人才培养、团队建设等方面,薛其坤同样成果显著。他的团队中已有1人当选中国科学院院士、30余人次入选国家级人才计划,共培养博士生、博士后120余名,为我国低维物理、量子材料领域建立了具有国际水准的人才队伍。

山区里驶出的“小船”,如今已成为驰骋在科学海洋里的“巨舰”,在潮流浪尖领航。