



2002年10月,李德仁(左一)在三峡大坝建设工地。

■ 武汉大学供图

联合国一项统计显示,80%以上的人类活动都要和时空发生关联。李德仁说,地球空间信息研究者就是要为人们提供与位置有关的信息,即“4个right”服务:在规定的时间(right time)将所需位置(right place)上的正确数据、信息、知识(right data/information/knowledge)送到需要的人手上(right person)。这一切要求快速、准确、灵巧。

在地球空间信息科学领域,遥感技术至关重要。作为人类经济建设和社会可持续发展的关键支撑手段和战略需求,遥感技术在生物多样性保护、防灾减灾、粮食安全与绿色农业、城市发展、水资源管理等方面起到了不可替代的作用。

在近40年的科研时光里,李德仁致力于提升遥感对地观测水平,持续开展基础理论研究和重大技术创新,倡导、推动和建立了我国高精度高分辨率对地观测体系,推动了测绘遥感的跨越式发展,为我国从测绘遥感大国到测绘遥感强国的转变作出杰出贡献。

他凭借卓越智慧破解了测量学的百年难题,他带领团队以服务国家为心目目标开展科技攻关,他以满腔热血浇铸遥感强国梦。

6月24日,李德仁获得2023年度国家最高科学技术奖。

解决百年难题

1957年,李德仁从江苏省泰州中学毕业,被刚成立一年的武汉测量制图学院(后易名为武汉测绘学院)录取,就读航空摄影测量专业。

对于那时的中国来说,卫星遥感技术还是一片未被开垦的“荒原”。但李德仁深知这些技术对于国家发展的重要性,毅然决然地踏上这条充满挑战的道路。

1978年,“科学的春天”来临,国家恢复研究生招生。李德仁抓住这个机会重返校园,并师从我国摄影测量与遥感学科奠基人、中国科学院院士王之卓。

完成硕士学业后,李德仁出国深造,来到当时世界上摄影测量与遥感技术最先进的国家——德国。1982年,李德仁进入德国波恩大学进修。在短短半年时间里,他就在国际学术期刊发表了两篇高质量论文,首创了从验后方差估计导出粗差定位的选权迭代法。这一方法后被测量学界称为“李德仁方法”。

次年,他又进入斯图加特大学攻读博士学位,师从摄影测量领域世界著名领军学者弗里兹·阿克曼,并接手了一个航空测量领域极具挑战的难题。

李德仁回忆,航空测量数据的误差是当时的世界性难题。“航空测量遥感数据越来越大,老师给我的题目就是找一个理论,能同时区分和处理偶然误差、系统误差或粗差。”他说。

为了尽早解开这道难题,李德仁每天坚持工作14个小时以上,经常在凌晨最后一个离开实验室,又于翌日清晨第一个打开实验室大门。

最终,仅用不到两年,李德仁就完成了自己的博士论文,并获得了斯图加特大学博士论文历史最高分,迄今无人超越。他创立的误差可分区性理论和系统误差与粗差探测方法,被德国洪堡基金评委格拉法特评价为“解决了一个测量学的百年难题”。李德仁后来也因此获得了1988年“汉莎航空测量奖”。

“回国是必然的,是自觉的。我们与外国有很大差距,我得赶快回国。”李德仁谢绝了国外科研院所的邀请,在完成毕业答辩后立刻回国,短短几天后便走上讲台,在武汉测绘学院任教。

“学到本事就要给国家作贡献。”这是李德仁那时最真实的想法。“科学是要为祖国服务的”,在他心里,一直抱有这个坚定的信念。

做强中国遥感

学成归来,李德仁加快研究步伐,带领团队持续开展基础理论和重大技术创新,助力我国测绘遥感行业飞跃发展。

很快,他们取得了一个又一个创造性成果。1991年,李德仁提出3S集成(GNSS全球卫星定位系统、RS遥感、GIS地理信息系统)理论获得国际认可。这一重大突破,实现了天空地一体信息化移动测量的历史跨越。

面对我国卫星、航空、地面系统等落后于人的情况,李德仁心急如焚。2003年,他作为牵头人向国家提出“建设我国高分辨率对地观测系统”的建议。高分辨率对地观测系统重大专项(以下简称“高分专项”)是《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》确定的重大科技专项之一。其中,自主可控的天空地高分辨率遥感系统是核心。

李德仁瞄准我国高分专项的核心需求,组建百余人的团队,历时15年先后完成体系论证、技术攻关、系统研制和重大应用,助力天空地高分辨率遥感系统实现“好用”和“用好”,满足经济建设、国防建设和民生的需求。

2013年,高分专项首发星高分一号成功发射;2019年,国内首颗民用亚米级高分辨率立体测绘卫星高分七号发射;2022年,分辨率达到0.3—0.5米的商业遥感卫星发射……随着高分专项的实施,中国遥感卫星实现了从“有”到“好”的跨越式发展。

如今,我国测绘遥感技术从落后一步步走到了世界前列,建立起真正的“中国人自己的高分辨率对地观测系统”。在这个过程中,高分专项作出了重要贡献。李德

仁说:“以前我们有卫星,但不强。现在我们的遥感卫星赶上了世界水平。”

此后,李德仁继续带领团队攻克高精度高分辨率对地观测领域的系列核心技术,研制了我国“航天—航空—地面”3S集成的测绘遥感系列装备,解决危险地区测绘等难题,引领了我国传统测绘到信息化测绘遥感的根本性变革。

创新的原动力就是实现自立自强。在李德仁看来,科学精神首先是实事求是,要尊重科学、尊重前人、尊重专家,但不能迷信书本、迷信权威、迷信外国技术。

“我们测绘人要坚持不懈地开展原始创新研究,想国家所想,急国家所急。要在新型信息基础设施、融合基础设施和创新基础设施建设中发挥作用,为将我国建设成为国际领先的测绘科技强国贡献力量。”李德仁说。

擦亮“东方慧眼”

“要把天上的大数据经过人工智能处理,变成小数据送到用户的手机上,这样才能实现分钟级的智能服务。”李德仁说,以前,天上的遥感、导航、通信卫星各忙各事,没有联通,所提供的服务老百姓用不上。

为此,李德仁带领团队积极开展“通导遥”一体化天基信息实时服务系统(PNTRC)关键技术攻关,启动珞珈系列科学试验卫星工程,研制发射4颗珞珈系列卫星。

不仅如此,李德仁还推动“通导遥”一体化的“东方慧眼”智能遥感星座计划建设。“东方慧眼”智能遥感星座计划极为宏大。通过部署在天上的遥感卫星组网,能够建立从全国到全球的服务系统,把目标看得快、看得清、看得准、看得全、看得懂……

从2022年起,李德仁带领团队开展“东方慧眼”智能遥感星座论证工作。为将“东方慧眼”擦得更亮,李德仁侧重在卫星精度和质量上下功夫,使卫星遥感分辨率从5米到3米、到2米、到1米,再到0.5米。

2023年4月,“东方慧眼”智能遥感星座一期工程正式启动。2024年2月3日,由李德仁担任首席科学家研制的东方慧眼高分01星成功发射,顺利实现业务化运行。

作为“东方慧眼”智能遥感星座的业务首发星,这颗卫星的成功发射是“通导遥”一体化智能遥感卫星系统的重要实践,对后续星座建设具有重大意义。该星投入运行后,可通过聚合高性能算力、引入人工智能遥感大模型,为行业提供实时时空观测智能化分析决策服务。

李德仁团队预计,到2030年,“东方慧眼”智能遥感星座计划将发射252颗卫星,包括高分辨率光学和雷达卫星、高光谱卫星和热红外卫星,形成“星网”。这些卫星将为人类社会可持续发展服务。

“到那时,我们的卫星使用成本会更低,每个人都有望轻松使用卫星数据,从‘玩微信’到‘玩卫星’。”谈及未来,李德仁满怀憧憬。

培养栋梁之材

在自己所有的头衔中,李德仁认为,当老师才是他最骄傲、最有成就感的事。

李德仁曾说,恩师王之卓有两段话让他记了一辈子。其中一段是在王之卓学术思想研讨会上,王之卓在会议门口看着会标,问工作人员:“我有什么学术思想?我的思想就是不断地跟我的学生学习。”

李德仁也把这句话送给自己。他说,作为一名教师,他可以培养一代又一代的年轻人,而年轻人在任何细节上超过自己,都让他感到高兴。

数十年来,他在武汉珞珈山下甘为人梯、殚精竭虑、为国育才,始终奋斗在教学科研第一线。他引导学生在学科交叉前沿刻苦攻关,获得高等教育国家级教学成果。

执教30多年,谈及指导博士生的成功经验,李德仁说:“我把我的老师教我的方法,传授给我的学生,那就是首先要学会做人,再学会做事,最后学会做学问。”

李德仁是这么说的,也是这么做的。他要求学生坚持“读书、思维、创新、实践”,做国家的栋梁。因此,他总把学生带到科研一线“拉练”,鼓励学生发现问题、解决问题,不断思考、大胆创新。

中国科学院院士龚健雅是李德仁的第3个博士生。“李老师破格录取了我,并对我进行了20多年的培养。相对于其他师兄弟,我是在他身边受教诲时间最长的学生之一。”他说。

龚健雅亲眼见证了李德仁等老一辈科学家在推动中国整个测绘学科发展过程中的一个个突破。在他看来,中国测绘学科发展逆势而上,国际影响不断增强,李德仁对此作出了很大贡献。

如今,李德仁的学生遍布世界各地,在测绘遥感领域内外各有建树。这是李德仁最为高兴的事。“科学研究就是不断创新,不断接力。”李德仁把学生的建树看成是自己最大的成果。“我要给学生指一条路,让学生自由发展,让他们超越我。”

直到现在,李德仁仍然坚持带博士生和硕士生。他的学生中,有的已经当选中国科学院院士和中国工程院院士。

苏黎世联邦理工学院授予李德仁名誉博士学位时指出:“李德仁院士的杰出成就,使武汉大学成为今天世界上地球空间信息领域最著名的研究院之一;他还对培养国家和国际学术人才作出了杰出的贡献。”

从毅然归国到开拓创新,从扎根科研一线到孜孜不倦教书育人,李德仁坚定不移地践行着自己的人生追求——一辈子为国家服务。他用自己的一生,诠释了中国科学家奋进、奉献、甘为人梯的精神。

吴纯新

进入信息时代,芯片已然成为处理信息的“大脑”。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算。”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。

经过多年探索,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,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;三是材料内必须为绝缘体,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一低温强磁场扫描隧道显微镜一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力学,发展出严格控制材料组分的三温度法,生长出国产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

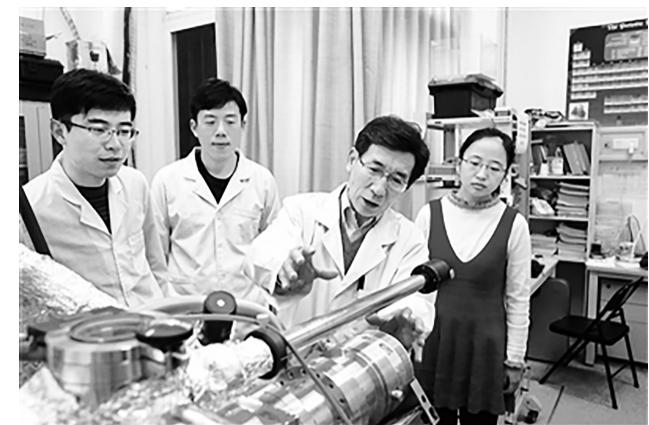
“当年薛老师找到我和几位老师,说国际上有理论预言,可以在磁性拓扑绝缘体中寻找量子反常霍尔效应,并邀请我们一起攻关来发现这个效应。”清华大学物理系教授王亚愚回忆,自己当时立即被吸引了。

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0.5纳米的薄膜并不难,难的是要在原子尺度上检测掺杂的元素,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



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

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。

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10时30分左右,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家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MnBi2Te4,这种材料具有规则排列的磁性原子和巨大的能隙,有可能实现更高工作温度的量子反常霍尔效应,从而使它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效应的证据,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。