

基础研究突破与杰出人才培养

► 薛其坤

改革开放以来，我国科技发展成就举世瞩目，载人航天与探月工程、北斗卫星导航系统、深海科考和载人深潜器技术、量子技术、高性能计算以及先进核能研究等系列重大科技成果竞相涌现，在某些重大科技创新领域已实现从零到一的突破。同时，必须清醒认识到，我国的基础研究总体水平与欧美等发达国家仍存在一定差距，在科技发展道路上还面临诸多问题与挑战，例如，原始创新能力亟待提升、国际顶尖人才数量不足、科技创新治理体系尚待完善、学术生态体系构建仍需加强等。2020年9月，习近平总书记在科学家座谈会上纵论新发展阶段加快科技创新的重大战略意义，指出加强基础研究要持之以恒、久久为功，不断坚持；要以探索世界奥秘的好奇心来驱动基础研究；要创造有利于基础研究的良好科研生态。在创新人才培养方面，要加强数学、物理、化学、生物等基础学科建设和本科生培养，在数理化生等学科建设一批基地，吸引最优秀的学生投身基础研究等等。2021年4月，习近平总书记在清华大学考察时强调要用好学科交叉融合的“催化剂”，加强基础学科培养能力，打破学科专业壁垒，对现有学科专业体系进行调整升级，瞄准科技前沿和关键领域，推进新工科、新医科、新农科、新文科建设，加快培养紧缺人才。总书记如此浓墨重彩地强调基础研究和人才培养的重要性，正是抓住了我国加快科技创新的源头活水。本文结合自己多年科研体会和实践思考，通过几个科学突破的案例，阐释加强基础研究和人才培养的必要性，并强调杰出人才培养需高度重视科学精神的塑造和学科规划等。

全球科技竞争与基础研究的重要性

当今全球正处于百年未有之大变局，以信息处理、

薛其坤，中国科学院院士，南方科技大学校长，清华大学物理系教授，研究方向为扫描隧道显微学、分子束外延、拓扑量子物态和高温超导等。



信息储存、信息显示、信息传输和信息探测等为代表的信息技术 1.0 时代，正在进入以量子计算、量子通信、量子精密测量等为代表的信息技术 2.0 时代。过去的十年正是其交汇期，量子技术革命将对社会科学、自然科学、工程科学的方方面面产生影响，甚至未来将可能引发新的科技革命。众多发达国家都在积极推进量子技术战略部署，以求在国际前沿科技领域取得领先地位。例如，美国的“国家量子计划法案”（2018）、欧盟的“量子旗舰计划”（2018）、英国的“国家量子技术计划”（2013/2018）、德国的“联邦量子技术计划”（2018）、荷兰的“国家量子技术计划”（2020）和日本的“量子飞跃旗舰计划”（2018）等。中国要建设成为世界科技强国，就必须在现代技术、关键技术上实现自主可控，把主动权掌握在自己手里，只有这样才能在新一轮的科技竞争中占据优势。

众所周知，强大的基础研究是建设世界科技强国的基石。诸如，曾获 1956 年诺贝尔物理学奖的晶体管这一发明，当时是为了替代体积大、功耗大的电子管，晶体管的出现还催生了于 2000 年诺贝尔物理学奖的集成电路的发明；曾获 2007 年诺贝尔物理学奖的巨磁阻效应，当时就是为了寻找新的磁传感器；曾获 2010 年诺贝尔物理学奖的石墨烯，当时就是为了寻找后摩尔

时代能替代硅（Si）的材料；曾获2014年诺贝尔物理学奖的氮化镓（GaN）就是为了制备出能发蓝光的发光二极管；本人带领团队发现的量子反常霍尔效应是为了降低电子器件能耗和发展量子计算等而催生的“从零到一”的科学突破。以上例子说明，面对国家重大需求和具有重大应用前景的原创性基础研究常常会催生科学上的重大发现，也可以说两者相辅相成。无论是信息技术的1.0时代还是2.0时代，量子科技领域的基础研究和突破都起到了关键作用。

在国家发展的关键时期，着力加强支持重大应用目标导向的原创性基础研究，支持面向国家重大需求和自主发展的基础研究，这既能占领科学高地，也能开拓新的应用高地。从这个意义上讲，不应当把基础研究和应用基础研究简单区分开来。假如发现了室温超导，发现了太阳能转化效率超过砷化镓（GaAs）但价格与硅（Si）比拟的太阳能电池，发现了硬度比拟金刚石、延展性比拟钢铁的材料，这不但属于重大的科学发现，而且具有巨大的应用价值，还有可能引发全新技术、产品和工具的发明。一项技术的应用前景越大，涉及的科学问题和技术问题往往越具有挑战性，原创性也越强，其颠覆性意义也越大，这是21世纪基础研究的重要特点之一。当前开展高水平原创性基础研究需要一批乐于基础研究、敢于冲击科学难题的杰出人才。在杰出人才的培养过程中，科学精神的塑造尤为重要。

科学精神的重要意义与品格塑造

科学问题的重要性

科学精神是科技工作者在长期科学实践中积累的宝贵精神财富，大力培养科学精神是加强基础研究人才培养议题的应有之义。一个好的科学问题对科学精神的塑造会起到“春风化雨、润物无声”的作用。例如，1915年爱因斯坦提出了广义相对论，广义相对论的一个基本推论就是引力波的存在。在引力波被提出百年

后，美国的实验人员于2015年用激光干涉仪（LIGO）这一重大科学装置直接测到了引力波，包括清华大学的曹军威团队也参加了这个项目的研究。该实验探测的是发生在13亿年前的一个重大天文事件：一个29个太阳质量的黑洞和另一个36个太阳质量的黑洞相碰撞合并成一个62个太阳质量的黑洞。这个巨大合并事件产生的引力波经过100万亿公里的漫长旅行到达地球而被观察到。尽管这一事件重大，但在地球上产生的时空扭曲仅仅在阿米量级，这就要求激光干涉仪的灵敏度要达到 10^{-18} 米水平， 10^{-18} 米相当于质子大小的万分之一。该实验的重要科学意义姑且不论，实验技术能力本身足以让人兴奋欣喜。现在高校十分关注多学科交叉，引力波便是一个典型的多学科交叉的例子，它涉及物理学、天文学、激光技术、精密仪器、计算机技术、低温技术、超高真空技术，甚至是土木工程技术等，这些学科汇集起来，最终实现了这个探测。该实验充分印证了大和小、远古与现代、时间与空间、人与自然等的辩证统一关系，这是非常经典的培养杰出人才实验范例。领导引力波探测实验的三位物理学家获得了2017年的诺贝尔物理学奖，同时这个实验也培养了一批掌握精密测量技术的工程技术人员。事实上，从1984年开始设计建造激光干涉仪到2015年第一个实验突破前后历时三十余年。试想，如果不是因为有这一很好的重大科学问题作引导和驱动，科学家和研究者们很难能坚持下来。

显而易见，科学精神的培养需要选择重要的或重大的科学问题。培养人才，除了教授基础知识、课堂知识以外，一定要帮助学生找到恰当且重要的科学问题。我本人所带领的研究团队一直致力于极具难度的前沿科学问题的研究，像纳米科学、量子反常霍尔效应、高温超导等，在解决这类重要科学问题的同时，优秀人才不断脱颖而出。自2000年回国至今，由本人指导顺利毕业或出站的已有110名博士/博士后，其中有80多位活跃在教育界和科技界，并且已有40余人入选国家人才计划。

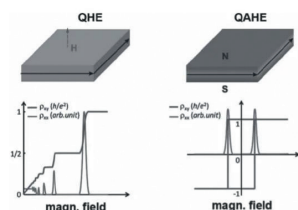


图1 从量子霍尔效应到量子反常霍尔效应

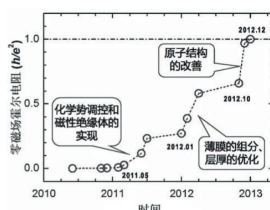


图2 量子反常霍尔效应实验的几个关键时间节点

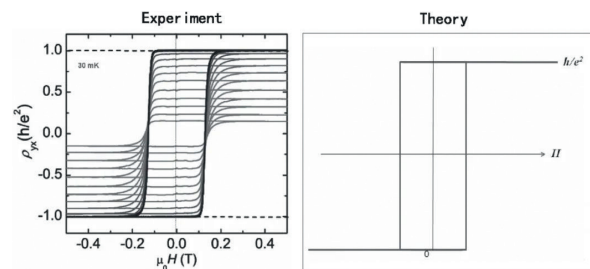


图3 量子反常霍尔效应的实验数据(左图)与理论(右图)对照

科学精神的锤炼

如何培养学生的科学精神? 在这里举一个扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, 简称STM)的例子。1981年, 两名瑞士物理学家基于量子隧穿原理发明了STM, 5年后的1986年获得了诺贝尔物理学奖。它给人类提供了一个在实空间直接观察原子的“眼睛”, 同时人们还可以用它操纵一个一个的原子: 像用砖头建造房子一样, 人们可以利用原子作为“砖头”建造纳米结构, STM开启了纳米时代和纳米科学领域。这个显微镜的工作原理非常简单, 它由一个可以三维运动的针尖和样品组成, 把两者进行电连接就构成了扫描隧道显微镜的基本结构。做STM实验时, 制备出理想结构的针尖极其关键。本人在上世纪八九十年代攻读硕士期间所用到的实验仪器为场离子显微镜, 样品就是尖锐的金属针尖。当时, 在导师陆华研究员的严格监督下, 本人每天至少要试做3个针尖, 两年多时间下来共制作了1000多个针尖, 在这方面积累了丰富的经验, 最终能在短时间内制作出接近实验要求的完美针尖。尽管两年多的时间没有发表任何文章, 也没有取得任何重要研究成果, 但锤炼了娴熟的动手能力以及敏锐的洞察力等, 逐渐养成了追

求极致的科学精神。后来在做量子反常霍尔效应实验时, 需要利用STM精确表征样品, 制备1000多个针尖的经历使本人在这方面具备了明显的先发优势。这段经历的启示是, 科学精神的培养需要日积月累, 需要高强度的反复训练和意志的磨炼, 需要在磨练过程中不断精益求精, 脚踏实地做好每一次实验, 不断冲击新的极限。该例子亦是“滴水穿石”的写照, “滴水穿石”精神的锤炼比发表几篇高水平SCI论文或许更为重要, 这就是科学精神养成的意义所在。

下面再谈谈量子反常霍尔效应实验的一些体会(详见图1)。自1988年美国物理学家霍尔丹(Haldane)提出量子反常霍尔效应理论以来, 各国科学家都在探索如何从实验上实现。2005年前后拓扑绝缘体概念的发展使得实验路径变得清晰, 但是实验难度极大。实验的一个关键是要制备出一个极其特别的样品——兼具磁性、拓扑和绝缘三重性质的超薄膜。磁性和绝缘性质一般情况下是互相矛盾的, 比如玻璃没有磁性但它是绝缘的, 磁铁有磁性但它是导电的。拓扑性和磁性类似, 一般也互相矛盾。这就像要培养一名运动员, 既需要姚明的身高能把篮球打好, 需要博尔特的速度跑得快, 还要滑冰运动员一样灵巧, 这种三不像材料的秉性对实验提出了巨大的挑战。从2008年起, 由清华大学物理系和中国科学院物理研究所共四个研究组二十多位博士研究生组成的联合团队, 利用五台精密的实验仪器, 制备测试了一千多个样本, 历时四年多时间于2012年年底才最终完成这个实验(详见图2)。团队中的博士生几乎每天都在重复一个实验, 其实验过程实属不易, 坎坷曲折, 困难重重。当实验过程非常艰难或者毫无进展时, 导师需要不断地鼓励学生, 花时间关心学生的成长与思想动态, 给予其足够的指导和帮助, 研究团队成员需要交流、勤沟通, 一起并肩分析实验无进展的原因。在这种并肩作战的过程中, 一个改善样品方法的发现、一个技术问题的解决常常都会使大家兴奋不已, 正是这一个个小的进展最终导

致了科学上的突破。回首整个实验过程，可以发现，正是这种面向重要科学问题的艰苦探索过程培养了学生发现问题的能力、分析问题的能力以及解决问题的能力。在不断的探索中，学生会形成非常敏锐的洞察力，学会抓住实验中的蛛丝马迹，慢慢达到对实验技术的驾驭炉火纯青的程度。为了理解实验结果，还需要研读很多的文献，由此对研究领域的理解也随之入木三分。这种扎实过硬的实验技术和严谨求是的科学精神就是在长期的探索中潜移默化植入了每位研究者的灵魂之中。理论与实验的完美符合（详见图3），让团队的每位参与者最后享受到了科学大道至简的美妙和喜悦。

杰出人才与强基计划

杰出人才需具备哪些特质呢？通过上面的几个例子，笔者认为，第一，要具备扎实的理论基础，需要对专业理论知识的理解入木三分，对相关学科的理论 and 知识能够融会贯通，对专业实验技术仪器和方法的驾驭炉火纯青。第二，要有卓越的科学直觉，这种直觉包含具有发现问题和解决问题的突出能力，有擅于透过现象看本质的犀利眼光，有擅长归纳演绎等杰出思辨能力。第三，要有对探究自然奥妙或者思考科学问题浓厚的兴趣，有强烈的解决问题愿望。在科学探究中，要有虽千万人吾往矣、敢于挑战权威的勇气，要有百折不挠、追求极致、挑战极限的品质品格。同时，在价值观层面，还需要有为祖国强大和民族复兴献身的远大抱负和理想等。以上便是杰出人才应该具备的基本素质。

习近平总书记在《求是》杂志发表的《努力成为世界主要科学中心和创新高地》中强调：全部科技史都证明，谁拥有了一流创新人才、拥有了一流科学家，谁就能在科技创新中占据优势。因此，人才是创新的第一资

源，杰出人才更是加强基础研究、推进原始创新的主力军。分析自1966年图灵奖设立以来至2020年的74位获奖者，可以发现获奖者几乎全部都是来自世界一流大学和一流学科。截至2021年4月，世界各高校的图灵奖获奖人数依次为美国斯坦福大学（29位）、美国麻省理工学院（26位）、美国加利福尼亚大学伯克利分校（25位）、美国普林斯顿大学（16位）、美国哈佛大学（14位）。尽管图灵奖是计算机理论和软件的最高奖，但在位于前十成就的获奖者中，作为基础研究的数学、物理领域的专家学者共有10位，电子学领域专家仅有3位（详见表1）。同时，获奖者平均年龄为35.5岁左右，年轻化趋势明显。这说明越是基础的领域才越能产生出顶尖的、具有颠覆性和引领性的人才和成果。我国的“强基计划”正是针对未来杰出人才选拔基础学科拔尖学生进行重点培养，这具有强烈的时代意义。

为了落实教育部《关于在部分高校开展基础学科招生改革试点工作的意见》，清华大学于2020年5月成立了五大书院，实施强基计划，推进完善以通识教育为基础、通识教育与专业教育相融合的本科教育体系。学校的“强基计划”分为基础理科学术类专业、基础理科工程衔接类专业和基础文科类专业等三大类专业，分别侧重基础理科领域、理工前沿关键领域和

表1 图灵奖 TOP10 获奖者

排名	年份	获奖者	获奖时所在机构	标志性成果	获奖时年龄
1	1983	Ken Thompson	贝尔实验室	UNIX 操作系统	24
		Dennis M. Ritchie		C 语言	26
2	2004	Vinton G. Cerf	DARPA	TCP/IP 协议	35
		Robert E. Kahn		网络互联	40
3	2016	Tim Berners-Lee	麻省理工学院	万维网之父	34
4	1982	Stephen A. Cook	多伦多大学	计算复杂性理论奠基人	28
5	1969	Marvin Minsky	麻省理工学院	人工智能之父	31
6	1981	Edgar F. Codd	IBM	关系数据库之父	47
7	1988	Ivan Sutherland	Evans and Sutherland (自创公司)	计算机图形学之父	25
8	2009	Chuck Thacke	Microsoft Research	现代个人电脑设计者	47
9	1985	Richard M. Karp	加州伯克利大学	NP-完全性理论提出者	36
10	2000	姚期智	普林斯顿大学	密码学与通信复杂度	54

基础文科领域等方向的人才培养。为配合“强基计划”的顺利实施，学校在人才培养上进行系统性改革。一是以书院制为基本组织形式，统筹推进“强基计划”。通过设立致理、未央、探微、行健和日新五大书院对应不同的学科类别进行专业化人才培养。2021年4月，清华大学又新增求真书院，以保障丘成桐数学科学领军人才培养计划顺利开展，培养未来数学及相关领域的领军人才。未来书院之间、书院与普通院系之间的协作与沟通机制是保障计划能否实现的关键。二是推进本硕博高度衔接的贯通式学制改革。例如，求真书院通过“‘3+2’+3”实现从本科到博士阶段的贯通衔接，“3+2”阶段前三年为数理基础课程学习，第4、5年为科研训练，博士阶段的“3”则是指三年职业科学家学习训练。三是注重建构个性化、多样化的人才培养模式。在提供一流硬件资源，通过导师制、小班化、学科交叉、探究性学习等多种方式挖掘学生潜质，鼓励追求卓越。四是以科教融合为手段的学生使命驱动机制。通过国家重点实验室、集成攻关平台、前沿科学中心等深化科教协同育人，面向国家重大需求吸纳并培养学生积极参与前沿科技研究的使命感、责任感和志趣。本科毕业学生符合免试读研要求的，优先推荐其进入到硕士、博士阶段学习。五是注重提升学生的国际化视野与能力。通过多种形式交流活动选派学生赴国外一流高校或科研机构进行学习交流；并邀请国际知名学者赴校开展短期授课、学术研讨、前沿讲座等多种形式交流活动。这些实践探索，与杰出人才培养较为契合。

总的来看，原创性基础研究是培养优秀和杰出人才的摇篮。为此，必须着力营造一个有利于从事前沿基础研究的氛围，制定鼓励和引导更多优秀学子从事基础研究的政策，这对建设科技强国和实现中华民族伟大复兴的中国梦意义重大。

学科规划与人才培养

学科建设已成为提高学校办学水平和人才培养质

量的关键，学科建设的状态关系着高校的整体办学实力、学术竞争力和社会影响力。只有抓住学科建设这条主线，才能作到纲举目张，统揽抓好学校各个方面的工作。做好学科规划要关注国家重大方针政策，中国要建设成为世界的科技强国，就必须在未来产业的源头对应的基础性研究和科学发现方面作出中国贡献，一定要在现代技术、未来关键技术上实现自主可控，把主动权掌握在自己手里。要对一些问题提前进行深入分析、仔细思考，比如哪些基础研究具有前瞻性，正在进行的研究是否具有前瞻性，哪些成果具有原创性，哪些技术具有引领性和颠覆性，哪些突破可以称为重大成果等。高校在规划时要带着这些问题，面向未来，结合国家重大战略与社会需求有的放矢地前瞻性布局。具体来看，第一，要从对未来的社会、科学和技术的发展趋势做出认真分析、研讨，做出基本准确的判断，开展前瞻性、基础性、引领性研究。第二，要对未来的人才需求情况有基本准确的认识，结合现有人才情况做好特色化人才培养规划。第三，要有超前意识与冒险精神，决不能实行“走一步、看一步”的亦步亦趋式发展模式。第四，要坚持有所为有所不为，要聚焦重点和特色。第五，要把学科建设和人才培养有机融为一体，促进学科建设和人才培养一体互促发展；要充分认识到国家当前历史战略机遇期对人才的渴求，学校不仅要培养优秀的本科生，也要考虑如何培养优秀的研究生、博士后、青年教师，这是个系统工程。在这个系统培养过程中，“强基”固然重要，科学精神的培养同样重要。

总之，当前研究型大学要把握全球科技发展竞争态势和我国面临的时代挑战，认真研判学校学科专业建设中的关键制约要素与发展短板，进而为制定科学的学科发展规划提供有效依据。高校应当给科学家尤其是从事基础研究的科学家创造宽容淡定的学术生态，让其能够沉下心来，不跟风、不浮躁，潜心多年研究基础科学中重要的基本问题，力争做出高质量的科学探索 and 科技创新，以此培养具有科学精神的时代新人。