

十年，终于让 STM 的扫描头转起来

■本报记者 倪思洁 ■葛家诺

在位于北京的中国科学院物理研究所(以下简称物理所)实验楼里,一台占地十几平方米的超级科研装备正悄然运转。

试验台上,金属管道蜿蜒如血管。实验台下的深坑里,液氮在杜瓦中维持着-269℃的低温,18 特斯拉(T)的磁场强度足以将 1 吨重的铁块吸到天花板上。最吸引人的,要数仪器控制屏幕上扫描着的材料表面晶体结构和一道道起伏的谱线,以原子尺度的精度勾勒出材料中电子态的微观结构。

这是物理所研究员潘庶亨团队在国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)国家重大科研仪器研制项目支持下,耗时 12 年研制的“极端条件超高精度实空间 / 动量空间原位谱仪”,也是全球首台将实空间扫描隧道显微技术与动量空间角分辨光电子能谱原位集成的极端条件超高精度科研仪器。

“仪器就像科学家的眼睛和耳朵。”潘庶亨说。这位古稀之年的科学家,年轻时在工厂车间打磨零件,中年时在欧美顶级实验室搭建科研设备,如今带着团队闯出了一条中国高端科研仪器的自主创新之路。

从“被拒”到“世界首台”

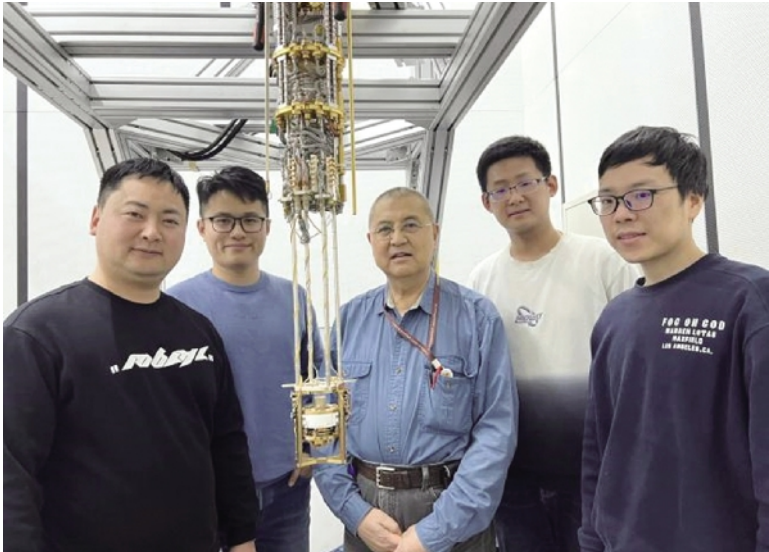
潘庶亨毕业于苏州大学物理系,从 1984 年出国攻读博士学位起就一直在研制量子扫描隧道显微镜(STM)系统,并用其研发的先进仪器设备从事基础科学的前沿研究工作。他曾在若干世界著名实验室中研发创建了多合世界领先的超高精度低温 STM 系统。2001 年,在 52 岁那年,他被美国休斯敦大学物理系聘为终身正教授和该校得克萨斯州超导中心冠名正教授。

使用 STM 观察微观原子世界的科学家们,常常希望在极低温环境下同时给材料施加强磁场环境,以便观察材料在极低温强磁场极端条件下的状态变化。然而,传统旋转磁场的矢量磁体方案因结构和材料的限制,至多只能实现 2~3T 的旋转磁场,无法满足科学家对全方位强磁场的要求。

2008 年,潘庶亨萌生出一个大胆的设计,可不可以极低温强磁场条件下让 STM 的扫描头转起来?也就是说,将传统的“旋转磁场”的方案改为“在固定磁场中旋转 STM 探头”,以此突破传统矢量磁体旋转磁场强度的瓶颈。

怀揣着这个想法,他与美国橡树岭国家实验室厄尔·沃德·普拉默(Earl Ward Plummer)教授、时任美国国家强磁场实验室主任的杰克·克劳(Jack Crow)教授,以及美国佛罗里达国际大学教授张坚地一起组建团队来实现这个想法。

然而,当他们拿着这个创新的设计方案向美



整机组装前,潘庶亨(中)与项目研制团队中的部分主要成员以及他们创新研发成果的关键部件——极低温强磁场双轴旋转 STM 扫描头”合影留念。

受访者供图

国国家自然科学基金会申请经费时,却遭到了拒绝。潘庶亨和合作伙伴们的热情被泼了一盆冷水,他们心有不甘,却又十分无奈。

2010 年,潘庶亨离开休斯敦大学,来到物理所工作。彼时,我国正大力推动原创性重大科研仪器研发。

在国内同行专家的鼓励下,他心中的火苗重燃起来,并迅速组建团队,向自然科学基金委提交了研发“极端条件超高精度实空间 / 动量空间原位谱仪”的申请。

在项目申请书中,他们写道:“该设备的建成将使我们能够开展若干至今不能开展的实验,为实现复杂功能材料的原位测量和人工设计提供最尖端的实验平台,为我国在材料科学前沿领域实现新的突破创造机遇。”

2012 年,项目顺利获批。潘庶亨将这个好消息告诉了曾经的合作者 Plummer 教授,对方发邮件说:“潘,祝贺你!我知道你一定能实现这个想法!”

“我们的目标是研制世界上首台极端条件下的超高精度实空间 / 动量空间原位测量系统,并率先采取这一尖端实验手段,在凝聚态物理和材料科研中捷足先登,以期在低维电子体系、拓扑材料、非常规超导体等研究中发现新物态、新现象、新规律。”潘庶亨说。

造一台世界顶级的“大玩具”

项目申请下来后的 12 年里,潘庶亨沉浸在仪器的研制任务之中,生活变成了由三个点围成的“小圈子”——实验室、食堂,以及离实验室和

食堂都不远的家。他的太太看着他乐此不疲地在“小圈子”里生活,开玩笑地抱怨:“你别的事情都不干,整天就知道玩你的‘大玩具’!”虽然嘴上这么说,但她全力支持他这种“生活方式”,承担着家庭的各种责任,并不断鼓励他。

这台被潘庶亨太太称为“大玩具”的仪器,由四大子系统构成:极低温强磁场转角扫描隧道显微谱仪(STM)、极低温角分辨光电子能谱仪(ARPES)、超高精度氧化分子束外延系统(OMBE)和氧化物脉冲激光沉积系统(LMBE)。

里面的两台谱仪用来检测材料中电子微观结构的设备。其中,STM 是“大玩具”里的核心关键设备,能在接近绝对零度(-273.15℃)和全方位旋转超强磁场中,以原子级精度“捕捉”材料的微观几何构型和电子能态的微观结构,甚至能通过旋转探头多角度观察磁场对材料的影响。ARPES 则能以超高的动量和能量分辨率,测量材料内部电子的能量分布和运动方向。

另外两台设备是制备精密材料的。它们能够在原子尺度上实现材料的可控生长,制造出超薄、超平整的功能薄膜。

四大子系统之间通过能保持低温环境的真空管道连接在一起,管道里的机械手臂可以把制备好的样品直接送进谱仪里,实现从材料制备到实时观测的“一站式”研究。

作为团队牵头人,潘庶亨负责协调这一庞大复杂的科研装置中各子系统的研发和对接,同时主导了 STM 子系统以及 ARPES 子系统中极低温制冷系统和 6 轴样品台的研发建造。其余两个材料制备子系统则由相关领域的团

队专家主导。

潘庶亨研制“大玩具”的地方,在物理所一楼的实验室内。仪器一半安装在地面的抗振动试验台上,另一半放在 4 米深的大坑里,坑里是安装着制冷机的杜瓦容器和深藏其中、悬挂在制冷机上的 STM 探头。

看着潘庶亨实验室里的大坑,有同事调侃他:“老潘,你给自己挖过多少坑?”“无数个!”他笑着答。

仪器研制过程中,最有挑战性的技术藏在 STM 探头里,那也是他给自己挖的最大的“坑”。“用旋转 STM 探头代替旋转磁场,属于原创性方案,在全球没有先例可借鉴。”他说。

2014 年,他带着团队先做出一个可以单轴旋转的 STM 探头,在整机试验成功后,一边用这台样机进行实验,一边开始放手设计制作双轴旋转样机。转轴的增加使探头内部的机构越发复杂,看起来并不大的扫描头中,光是导线就有近百根,稍有不慎就会继续折断或短路。为了避免导线缠绕、断裂和干扰,他们创新性采用了“电刷引线”方案破解了这个难题,最终制成国际首例能在极端条件下工作的双轴旋转扫描探头——整套 STM 的“心脏”。

除了 STM 探头,潘庶亨给自己挖的另一个“大坑”是产生强磁场的超导磁体 / 杜瓦系统。

超导磁体 / 杜瓦系统承担着达到毫开尔文级低温的稀释制冷机提供初级低温环境和超导磁体产生 18T 超强磁场的任务。为实现这一目标,他决定带着团队与英国一家知名的低温仪器公司联手研制。

尽管潘庶亨和那家英国公司都知道研制的难度很大,但他们万万没想到,经过两年多的努力,制造出来的样机竟没能达到指标要求。此后,历经一年的优化、多次改进设计,又经过一年多时间,中英团队才成功研制出世界首台大口径、强磁场、低液氮消耗、低振动、超高稳定的磁体 / 杜瓦系统,使各项指标达到国际领先水平。而这一突破也吸引了诺贝尔物理学奖得主克劳斯·

冯·克利钦专程到物理所的实验室参观。

一台捕捉科学发现的好仪器

历经 12 年攻关,仪器项目于 2024 年 6 月通过验收,其性能指标全面领先国际同类仪器。

在很多人看来,潘庶亨经历了沉寂的 12 年,几乎没有发表过基础研究的论文,也很少申请课题和项目。但是,他却乐在其中。

读大学之前,潘庶亨曾在苏州湖笔厂(后改为红旗电表厂)工作,从学徒开始当了 10 年技术工人,“车工、钳工、焊工、电工全干过,连电子仪表都自己设计制造”。这一经历让他不仅擅长动手,而且对精密设备的研发制造有着近乎直觉的掌控力。

在极端条件超高精度实空间 / 动量空间原位谱仪中,很多最基础的部件都是他带领团队自行设计制造的。为隔绝地面振动,他们从基建工程开始,设计建造了隔离地基和隔断墙体;为降低空气中的声波和电磁波干扰,他设计建造了专门的屏蔽室,还设计出一种可升降的门槛。门槛降下时,便于运输液氮罐子;升起时,能够有效屏蔽噪声。

回望潜心研制仪器的 12 年,他感慨:“在国家的大力支持下,我们通过自主摸索以及与国外先进技术合作研发,学到了很多,积累了大量的宝贵经验。这些知识和经验为我们今后研发建造相关的高端仪器装备打下了坚实的基础,也使我们建立了足够的信心,有能力承担更艰巨的高端仪器装备研发任务。”

目前,项目验收完不到一年,他的团队已经利用该装置在铁基超导体铁砷铁磷材料和超导带材等研究方向上有所突破。接下来,他们计划用这台设备在拓扑绝缘材料、低维量子材料、强关联电子材料、表面物理和奇异超导机理等前沿研究方向做更多的探索。

“科学发现常始于意外,如今我们已经有了一台捕捉它的好仪器。”潘庶亨说。

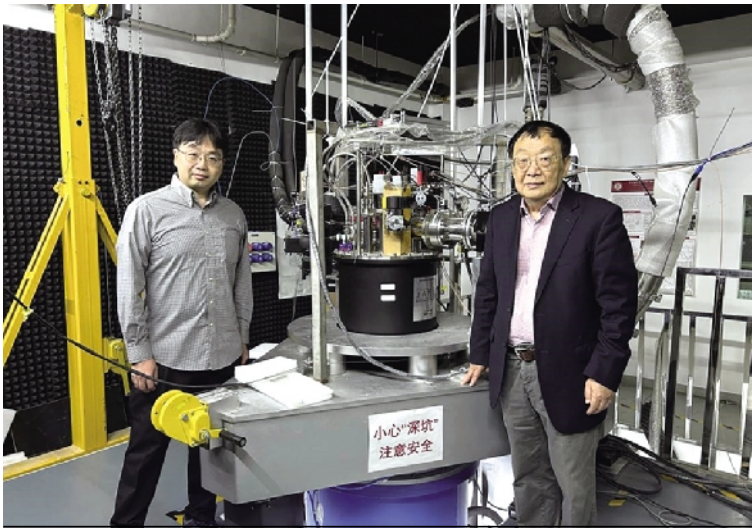
计,能做各种各样的事情。很多学生都成为公司的技术骨干。

《中国科学报》:这台科研仪器最终耗时 12 年。如果回到 12 年前,你是否还会申请这个项目?

潘庶亨:虽然耗时 12 年,但我并不后悔。这台仪器不仅对我国尖端实验设备的研发水平提高很有意义,也将为中国在非规范超导体、新型量子材料等领域的原始创新提供先进的技术手段。

里程碑就在“不可能”中

■本报记者 甘晓 ■宋书库



杜瑞瑞(右)、林熙在“拓扑量子计算超低温实验仪器”前合影。

研究团队供图

无液氮消耗的制冷机能达到的最低温度是多少?走进北京大学综合实验楼,穿过长长的走廊,来到位于地下二层的“崔琦实验室”,两台“拓扑量子计算超低温实验仪器”刷新了这个问题的世界纪录——0.1 毫开尔文,逼近人类无法抵达的“绝对零度”。

在国家自然科学基金委员会的国家重大科研仪器研制项目“拓扑量子计算超低温实验仪器”支持下,北京大学量子材料科学中心教授杜瑞瑞、林熙亲手打造了这两台仪器,创造了不消耗液氮进行制冷的“干式制冷仪器”所能达到的最低温度纪录。

近期,该项目顺利结题。“极低温下,我们不但可以验证已知理论,而且在探索无人区时甚至可能发现一些不可预期的新量子现象。”回首研发历程,该项目负责人杜瑞瑞说,“每一步都充满了不确定性,但我们始终坚持探索的信念。”

在这场科技竞赛中不能落后

世界上最低温度能达到多少度?在物理学中,0 开尔文,也就是-273.15℃,被称为“绝对零度”,是目前物理世界可能达到的最低温度极限。在理论上,分子运动趋于完全静止但仍存在零点能量子涨落。物质会展现出截然不同的特性,一些已知物理规律将面临挑战。

自 19 世纪末科学家们连续实现各种气体液化以来,人类便踏上了不断逼近绝对零度的漫漫长路。进入 20 世纪,随着氮气被成功液化,科学家首次触及 4 开尔文(约-269℃)以下的“极寒世界”,一系列常温下无法观测到的奇妙现象相继显现:水银的超导、液氮的无摩擦流动、分数量子霍尔效应、玻色-爱因斯坦凝聚态……这些前所未见的现象不断拓展人类对物理世界的认知边界,孕育出诸多新兴研究方向。

“低温环境是前沿探索的重要基础条件。”林熙告诉《中国科学报》。面向全球物理学家追逐的“低温”高地,中国科学家正在挺进这一未知领域。

除了前沿科学在理论认识上的巨大驱动,21 世纪以来的科技变革中,实现低温环境成为了下一代量子计算的迫切需求。

如今,量子计算迅速崛起的同时,现实挑战随之而至。随着量子比特数量增加,错误率会迅速累积,使大规模量子计算难以实现。

杜瑞瑞介绍,拓扑量子计算作为一种全新范

式应运而生。其利用拓扑保护的量子态作为信息载体,具有抗干扰能力,有望从根本上解决量子计算中的误差扩散问题。

然而,要验证和操控这些拓扑量子态,必须具备极端苛刻的实验条件,温度需稳定保持在 10 毫开尔文以下。

目前,拓扑量子计算在全球范围内竞争激烈。“我们不能在这场关乎国家未来的科技竞赛中落后。”自主创新研制超低温设备,率先掌握拓扑量子计算的核心技术,抢占全球量子科技制高点,是杜瑞瑞的研究初心。

站在科学挑战与时代浪潮的交汇处,杜瑞瑞从国外回到北京大学,就一头扎进研制超低温实验仪器的漫长征程,全力向“全世界最冷”迈进。

面对质疑 挑战“不可能”

要实现极低温环境,科学家们早已发展了多种制冷技术。从早期的液氮蒸发制冷,到通过稀释制冷系统将氦-3 与氦-4 同位素混合物相互作用,制冷温度已达到 10 毫开尔文左右。然而,这些传统制冷手段往往受到液氮等消耗型资源的限制,运行成本高、维护复杂,且难以实现稳定长期测量。

既然如此,那就不依赖液氮。杜瑞瑞与林熙决定另辟蹊径,采用一种被称为“核绝热去磁

制冷”的核心机制,构建一台“干式”超低温系统。这相当于把用液氮当“燃料”的“油车”换成“新能源电车”。

这一技术的核心思路是先通过外加强磁场,使载体材料中的原子核自旋趋于一致排列,形成高度有序的状态,随后撤去磁场,回归无序。在这一“打乱”的过程中,热量被吸收,载体温度得以大幅度下降。这个过程依赖于载体的量子性质,因此可以抑制制冷称为“量子冰箱”。

听起来容易,但将这一想法转化为工程实践,却面临着巨大困难。项目起步阶段,许多专家对他们的方案表示怀疑。

“专家们认为,最大的挑战在于如何消除制冷机和磁体工作时振动的影响。”接受《中国科学报》采访时,杜瑞瑞表示。

理论上而言,物质中微观层面的分子、原子的运动状态决定了其宏观层面的温度。通常而言,这些粒子越“静止”,反映出的温度越低。而外界的振动则会因为通过不同方式引入热量,从而提高其温度,让冷却失败。

干式系统运行依赖压缩机、循环泵等机械部件,产生的振动远大于传统湿式系统。在这一固有矛盾的背景下,通过干式制冷达到毫开尔文以下的超低温一度被认为不太可能。

当然,团队还面临更多现实困难。林熙坦言:“我们做的是原创仪器,不仅国际上没有先例可供参考,甚至连器件和部件都买不到现成的,只

能利用诸如铜块的基础材料,自主设计、自主加工、自主调试和验证。”这些都要求团队成员不仅深刻掌握物理原理,还需具备精密机械设计、材料科学、电子工程等多学科知识。

对此,杜瑞瑞在项目答辩时表示:“我坚信,只要设计合理,工程上循序渐进,这些困难都是可以克服的。”

经过反复测试与调试,2020 年,由林熙设计搭建的第一台设备,稳定实现 0.1 毫开尔文的极低温,比 1 毫开尔文的原定指标高出一个数量级。

他记得,在设备运转的声音中,指标逐渐优于预期值,最终定格在 0.09 毫开尔文——这是当前全世界近百万台干式制冷机的最低温度。“可以干点别的事情了!”他心里默默开始“走神”。

此后,在第二台设备的设计上,杜瑞瑞对其进行了升级,在原有基础上引入高磁场双磁体结构。这成为目前国内最大的一套磁体。为确保磁场之间互不干扰,他们使用了十几个补偿线圈进行精密调节,每一个构件都需反复验证,直至达到“链条中最弱一环也不掉链子”的要求。

最终,这套使用“最大磁体”的“冰箱”能够稳定连续运转达数月之久,这是传统设备无法实现的纪录。

2024 年,当两台超低温装置相继完成测试、达到预定指标时,许多国际同行表示祝贺。世界知名低温物理专家、美国普渡大学物理系主任 Gabor Csathy 专门发来贺信,称赞这是“低温物理

《中国科学报》:面向未来,你计划在这台仪器的帮助下,开展哪些科研工作?目前取得了什么样的进展?

杜瑞瑞:目前,我们正聚焦一个关键问题,即在“非常规超导”材料中,是否真的存在“非常规”的量子态。例如对氧化物、部分铁基材料,有可能具备拓扑超导的特性。如果能验证某个体系中确实存在拓扑超导,我们就能找到更可靠的路径,实现拓扑量子计算。

目前,这项研究已经取得初步进展。接下来,我们将依托这台超低温设备,在极低温环境下,通过热容、磁化率、热输运等手段对其进一步验证。

《中国科学报》:在自主研制这一重大科研仪器的过程中,你认为成功的关键是什么,有什么心得与青年学者分享?

杜瑞瑞:首先,我们一直坚持的一点是,创新型仪器的研究方案不是工程化的,而是一环扣一环的。每完成一步,就要根据实验情况调整下一步的方案,逐渐推进才能更可靠。这个理念对先进科学仪器的研制特别重要。

其次就是关注系统工程中最脆弱的环节。只有把所有薄弱点都找出来、优化掉,整个系统才能真正稳定运行。

科学探索不是一蹴而就的,需要坚持不懈的努力和对细节的极致追求。