



孙世刚(左)与研究
人员讨论实验
结果

在一个电池中,作为电极的固体与作为电解质的液体交界的地方,会发生奇妙的变化。这里被称为“界面”,通常只有不到20纳米厚,但它的结构和性质足以对电池的效率和寿命产生颠覆性影响。

自2011年起,中国科学院院士、厦门大学化学化工学院教授孙世刚作为学术带头人,在连续3期国家自然科学基金创新研究群体项目(以下简称创新群体项目)支持下,围绕“界面电化学”开展深入研究。过去9年里,他们从基础科学问题出发,将原始创新的链条延长到产业应用中,让“小界面”撬动起“大能量”。

聚焦! 从基础到应用

“界面电化学”创新群体项目始于2011年1月。基于厦门大学在电化学领域的深厚积累,孙世刚带领该校科研人员获得首期资助,于2013年12月顺利结题并通过国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)的考核,批准给予第一次延续资助。

2014年1月至2016年12月,第二期项目结题后,该项目又通过自然科学基金委遴选、择优给予第二次延续资助。在2019年11月召开的创新群体项目结题审查会议上,“界面电化学”获得全体评审专家的一致认可,以优秀的成绩顺利通过验收。

得益于我国电化学奠基人之一田昭武先生对基础研究贡献于社会的倡导,创新群体项目成员长期重视应用研究,已产生了大量基础和实用性成果。因此,孙世刚总结道,在“3+3+3”的创新群体项目中,研究人员从界面电化学的基础科学问题出发,越来越聚焦国家的重大需求。“我们第一期研究内容把所有的界面过程都囊括进来了,第二期内容则重在拓展新体系,更加关注基本方法和理论动态发展。”

“到了第三期以后,大家在商量,怎么能找到突破口,怎么把大家力量结合起来,真正

解决一些重要的科学问题,能够对国家的需求作出一些贡献。”孙世刚说。

在这一共识下,科研人员将新一期项目聚焦至能源领域。为了让基础研究真正面向应用,在第二期后期,赵金保被引进至创新群体项目中。曾在锂电池生产企业长期从事研发工作的经历,使他对基础研究的理解有着很强的应用导向。几年来,他带领课题组在国内率先成功研发第一代陶瓷功能隔膜和第二代具有多级温度响应功能的高安全性陶瓷隔膜,已经实现产业化,创造了20多亿元的产值。

赵金保介绍,目前具有自主知识产权的第三代高安全性功能隔膜,利用了独创的耐高温超薄层立体再修饰技术,大幅提高了电池安全性。

“小界面”撬动“大能量”

——记自然科学基金创新研究群体项目“界面电化学”

■本报记者 甘晓

孙世刚指出:“这9年3期项目的发展过程,不是仅仅围绕一个科学目标去发散,而是充分体现了在认识科学问题方面的不断深化,大家做了很大的努力,从基础研究做到了实际应用。”

利器! 方法学收获丰厚

电化学对于界面的关注,已经不是新闻。“界面发生的最重要过程就是电子转移,也就是氧化还原反应。”孙世刚告诉《中国科学报》,“物质到达界面,发生电子转移后变成其他物质再离开。”要为燃料电池、高能二次电池及钙钛矿太阳能电池等领域面临的实际问题寻找切实可行的解决方案,就必须通过更先进的原位表征技术,“看清”界面原子结构变化和分子反应等动态过程。

为此,创新群体项目成员廖洪钢设计、研制出液体芯片反应池,发展了“电化学原位超高分辨透射电子显微镜”,实现了原子/分子尺度实时微结构可视化的观测和实时物质元素价态变化的监测;任斌在国际上首次发展出电化学针尖增强拉曼光谱技术(EC-TERS),将检测灵敏度进一步提高5~6个数量级;杨勇开发的“高空间分辨电化学原位固体核磁共振技术”,在高比能

二次锂电池关键材料储能机理、电极反应规律及电极反应动力学研究上有着重要应用。

有了这些“利器”,科学家在界面表征上收获丰厚。例如,在高空间分辨固相和固液界面表征方面,任斌课题组利用电化学针尖增强拉曼光谱技术,完成了双金属模型催化纳米尺度空间分辨的电子性质研究,有望发展为原位表征催化剂表面结构及反应过程与机理的新工具。在固液界面动态表征方面,廖洪钢课题组则利用高时/空分辨原位透射电镜方法,首次观察到固液界面新奇的动态吸附层结构。

在孙世刚看来,探索方法学实际上是一件非常辛苦的事。“要花很多精力,投入很大。”他说,“创新群体项目支持我们从源头上基于科学认识创新方法,发展出更先进的仪器设备帮助我们认识更多的新现象,又反过来促进了我们对界面本质和科学问题的深入理解。”

合作! 优势互补相融相长

乐于合作的文化氛围,是创新群体项目的一个特色。用创新群体项目成员、中国科学院院士田中群的话说叫做“合为贵”。田中群和孙世刚是

在厦门大学读本科时住在同一个宿舍的同学,多年的深厚友谊让他们成为科研上的好伙伴。

“强调合作为贵,互相补台而不是互相拆台。”孙世刚指出。在创新群体项目支持下,厦门大学化学化工学院电化学学科的10多位教授发挥各自的强项,联手共同解决关键科学问题。

赵金保看来,创新群体项目为开展相关领域前沿科学研究提供了良好平台,把从事不同方向的科学家凝聚在一起,完成思想火花碰撞。

例如,擅长扫描探针表征技术的毛秉伟与擅长能源电化学基础的董全峰紧密合作,用一种非传统的电化学方法,实现对碱金属表面的电化学抛光和固态电解质界面(SEI)的原位成膜,不仅获得了大范围平整的金属表面,而且构筑了均匀光滑的SEI膜。“我相信这项研究能够解决产业界的一些实际问题。”赵金保告诉《中国科学报》。

到第三期创新群体项目结题答辩时,孙世刚看到团队乐于合作的氛围在年轻一代研究人员中越来越浓厚。“我很高兴,这个创新群体项目结束以后,不仅在厦门大学内部形成了协作攻关的氛围,而且与外面学校的课题组也形成了交叉合作,希望大家团结起来共同解决科学难题。”

聚焦能源前景可期 界面电化学

《中国科学报》:如何评价我国学者近年来在“界面电化学”方面取得的进展?

孙世刚:经过自然科学基金创新研究群体项目连续三期的支持,创新群体项目成员主要在高指数晶面纳米催化剂、电化学原位高时空分辨拉曼光谱、电化学能源体系界面微观结构和分子水平研究等3个方向上取得了不俗成绩,引领国际研究前沿。

这显著提升了以厦门大学电化学团队为代表的中国学者在国际学术界的影响力,也让中国成为国际上一个重要的界面电化学研究中心。

《中国科学报》:最近10年来,对界面电化学的研究从基础研究走向了产业应用,主要聚焦在哪个领域?

孙世刚:主要聚焦在能源领域。电化学作为一个学科,化学能和电能之间的转换和储存过程是这个学科关注的一个主要问题。最近几年在自然科学基金的倡导下,我们基础科学研究者立足学科、放眼国家重大需求,认识到电化学在化石能源优化清洁利用和新能源开发中能够发挥重要作用。比如,电化学可以直接把化石能源转换成电能,是清洁的。同时,电化学在能源领域的应用场景也发展很快,包括燃料电池、电动汽车等。所以,我们专门把燃料电池催化、高能二次电池、

钙钛矿太阳能电池等方向纳入界面电化学的研究内容中。我们从这些领域中的一些实际应用问题出发,去逐步凝练出源头科学问题开展研究。

《中国科学报》:目前这三类电池的 electrochemistry 研究中,什么方向是重点?

孙世刚:燃料电池商业化一直受阻于昂贵的铂基催化剂。怎样把催化剂效率提上去,同时把成本降下来,仍是未来研究重点。在这方面,我们在原位表征和理论化学的研究优势下,从纳米催化剂构筑到燃料电池集成,实现纳米一介观一宏观跨尺度的电催化界面过程监测和调控,力争在超低铂/非铂燃料电池方面取得突破。

高能二次电池的研究重点应放在研发新型高性能电极/电解质材料、新型原位/工况表征分析技术,探索新型电化学反应机制和开发新体系等方面。目前,我们已经在锂电池高安全性隔膜方面进行了产业化工作。

对于钙钛矿太阳能电池,这些年发展很快,特别是在材料设计方面。但仍然面临4个重要问题,包括提高效率、提高稳定性、解决铅毒性、解决光激活效应及滞后效应等。其中很多问题的本质实际上涉及到钙钛矿太阳能电池界面的优化,因此如何表征、优化和调控钙钛矿太阳能电池界面是关键,这正是界面电化学的优势。

《中国科学报》:面向未来,除了能源领域的应用外,界面电化学作为一个学科,还有可能在哪些方向上取得突破?

孙世刚:界面电化学是电化学的核心科学问题。按照现有的研究基础,未来有可能在基础理论、基于非贵金属催化剂的燃料电池、超高比能量密度和比功率密度储能体系以及解决一些国家重大需求方面取得重要突破。

比如,基础理论上通过超高分辨/空分辨实验研究结合理论计算和模型模拟,进一步理解界面结构以及溶液、离子和电极表面的作用。燃料电池的非贵金属催化剂则可以通过多功能的表面结构提升性能。而在储能体系方面,超越传统“离子-电子”的分离耦合储能新机制则应当得到重视。

除了能源领域,相关研究还有望基于对钢筋、混凝土界面复杂过程的研究实现精准监测钢筋腐蚀和安全性,以及开发不锈钢表面构筑和超耐耐腐蚀防护新技术。这些新技术已经并将进一步在国家重大工程上应用。

此外,面向国家微纳制造产业的重大需求,金属电沉积、电聚合、腐蚀和刻蚀等界面电化学过程,将在微纳机电系统、微纳结构功能器件、半导体晶圆抛光、高端电子制造(芯片大马士革铜互连、超大规模集成电路封装和集成中的电子电镀)等产业发挥重要作用。

学科交叉“撞”出基础数学“春天”

——记自然科学基金创新研究群体项目“代数与数论”

■本报见习记者 韩扬眉

近半个世纪以来,纯粹数学的发展呈现出各分支学科之间相互交叉与融合渗透的趋势和特点。在代数几何、数论、表示论、数理逻辑等这些十分活跃的领域里,原本在不同领域里“各自为战”的数学家意识到他们有着共同目标,并开始重新联合在一起。

不同方向的数学家思想与灵感的碰撞,正在催生重大的研究突破和进展。

打造平台 汇聚数学家

纯粹数学自成为独立学科以来,其研究和进展既拓展了自身的发展空间,也成为其他领域解决关键问题必不可少的工具、方法和理论。“学科交叉是历史自然发展的阶段,如今到了需要多个方向知识汇合的时期。”中国科学院院士、中国科学院数学与系统科学研究院院长席南华告诉《中国科学报》,世界本来是综合的,人们只是为了研究世界才把它割裂开。然而,就像“盲人摸象”,只研究其中一个方面,并不能反映整体性质,数学的各个分支也是如此。

过去几十年,李理论、代数几何、数论、泛函分析和数理逻辑等领域的交叉对其自身以及其他领域的发展起了巨大的推动作用。

席南华说,大家有共同的兴趣,同时还需要一个平台。从2014年开始,在连续2期的国家自然科学基金创新研究群体项目“代数与数论”的支持下,席南华牵头,有效地将代数和表示论、数论、数理逻辑及其相关应用等方向的数学家组织起来,合作交流,以期通过共同努力,做出具有开创性和引领性的世界一流成果,培养一批优秀年轻人,形成自己的研究特色。

灵感碰撞 成果涌现

6年来,围绕国际若干前沿领域的重大问题,项目团队成员取得了诸多优秀的成果。

朗兰兹纲领是21世纪最重大的数学问题之一,也是当今基础数学中非常活跃的研究方向。它源于1967年加拿大数学家罗伯特·朗兰兹给法国数学家安德烈·韦伊的一封信。信中,朗兰兹阐述了一项革命性的理论,将数论、代数几何与群表示理论这3个独立发展、看似毫不相干的数学分支建立起了深刻联系。

如今,与它有关的每一项新进展几乎都被看作是重要成果。其中L-函数被称为朗兰兹纲领的中心问题,因为它是联系着三大数学分支的桥梁,数学界著名的7个“千禧年大奖问题”——黎曼假设和BSD猜想都与它有关。

研究朗兰兹纲领,需要一支兼具数论、代数群、李群表示论和代数几何专长的研究团队。近年来,数学与系统科学研究院就发展了这样一支享誉全球的年轻队伍。

项目组成员、研究员孙斌勇证明了高阶Rankin-Selberg L-函数特殊值非零假设,这一成果被称为“孙的突破”。后来,他在博士论文及前人工作的基础上,在对L-函数的算术性质的研究中引入了构造上同调表示局部周期的分析方法,这一代数构造被国际同行称为“孙的上同调导出泛函”。利用这个代数构造,最终证明了关于线性周期的非零假设。

这是孙斌勇“十年磨一剑”的成果,其间他也常常思考卡顿,于是与其他数学家交流探讨。他受邀前往美国拜访以朗兰兹纲领见长的数学家江迪华,与新加坡数学会会长、新加坡国立大学教授朱程波交流合作。在他看来,数学是一项长期工程,做数学要慢一点,把每一步都走得非常扎实,一点一点进步,才会走得更好。

项目组成员在BSD猜想研究方向也取得了突破,研究员万昕证明了更一般的非正规情形下秩为0与1时的BSD公式,从而完成了秩为0与1的BSD猜想的证明。法国国家科学研究中心教授Christophe Cornut对此工作的评价为“数十年来发展的几乎所有方法集大成的皇冠性成果”。

2015年,研究员田野曾第一次对BSD猜想

给出了接近最终答案的线索,当时被国际同行评价为“中国继陈景润之后最好的工作”。最近,他与合作者将此前BSD猜想关于有理数域上带复乘椭圆曲线的反定理推广到了全实域上带复乘的椭圆曲线。

此外,研究人员在代数簇中向量丛的研究和极小有理切线簇的研究、算子代数和Riemann zeta函数的零点分布、Von Neumann代数的生成元问题和自由群因子的同构问题等方向上也作出了重要成果。

突破和进展得益于该研究院内部以及国内外同行广泛而深入的学术联系,这让数学家有了更多灵感闪现的瞬间。“这是一种智力活动,思想碰撞,而这种相互影响(产生的结果)往往比较隐秘,但十分重要。”席南华说。

培养人才 造就一流

当今和未来世界的竞争,根本上还是人才的竞争。在数学领域,亦是如此。

“我国还比较缺乏顶尖的、有影响力的数学家,我们一直朝这个方向努力,尽管成效可能比较慢。”席南华说。他们通过各种途径努力培养和造就一些具有竞争非尔兹奖等国际数学大奖实力的青年数学家。

通过项目的支持,团队大力鼓励研究人员通过访学、组织或参与国际会议和年度群体活动进行合作交流,开阔视野,扩大眼界。没有时间地点的限制,只要“有需要”就组织。

在科研人员看来,这种“近朱者赤”的潜移默化让他们受益匪浅,与世界顶尖数学家交流多了,了解他们在关心的问题,学习他们看待和思考问题的方式,有利于自己的成长。

数学被称为“年轻人的事业”,团队非常重视学生的培养,按照培养一流人才的标准设置相关专业的课程并授课,课程包括代数几何、代数数论、代数几何、李代数及其表示、线性代数群及其表示、Shimura簇等。此外还安排学生参加各类高水平学术交流活动等。

纯粹数学大多研究千百年来“未解之



席南华给国际数学联盟理事长 Carlos Kenig 颁发华罗庚杰出访问研究员证书

“谜”,是长期工程。因此,科研人员必须心无旁骛,持续专注,才能有所成就。

席南华表示,他们更重视营造浓厚的学术氛围。“就好像植物,必须有好环境才能茁壮成长。人也一样,即使是天才也需要合适的环境,我希望我们的科研人员每天开开心心、心情愉悦,让身体的潜能得到充分激发。”

为此,他们一方面在制度上营造宽松环境,给予科研人员充分的自主权,减少考核;另一方面,在行政系统上树立“服务”的概念,尽可能少打扰科研人员,不让他们为繁琐的事情分心。

此外,团队倡导学术平等,没有“权威”的意识。“年轻人在这里不会感到压抑,也不需要资深专家面前小心翼翼,事实上,大家可以很随意地开玩笑。放松、无拘无束,就没有任何东西可以限制人的发展空间了。”席南华说。

诸多举措使人才培养成效显著,在项目实施期间,团队中有1人当选为中国科学院院士,1人获得国家自然科学二等奖,3人获得优秀青年科学基金资助,有1人从副研究员晋升为研究员,有2人从助理研究员晋升为副研究员。

研究周期长,成功率低,论文难发表是纯粹数学研究的一大特点。而在现有“以文章论英雄”的评价机制下,数学家难免受到“非议”。“内心有标杆,自我有标准,不闻窗外扰攘之声”,这是创新群体项目成员保持“定力”的做法。

“阿基米德、牛顿、高斯、欧拉……这些伟大的科学家足以当我们的指路明灯,只要坚定信念,明确方向,其他事与我无关。”席南华同时也倡导年轻人这样做,“数学与系统科学研究院、数学研究者这样是要保持一颗单纯的心,当今世界纷繁嘈杂,但我们的数学之心如初。”

《中国科学报》:在代数和数论领域,国际前沿关注哪些方向?

席南华:朗兰兹纲领、BSD猜想、Hodge猜想、黎曼假设、算术代数几何、李理论、量子群和代数群表示论,双有理几何与模空间等都是代数学与数论领域国际关注的前沿且活跃的问题和研究方向。

基础数学的分支繁多,追求数学的统一性、各分支之间的相互渗透推动重大难题猜想的解决,是近年来基础数学发展的一个大趋势。

《中国科学报》:我国在代数和数论领域的优势方向及团队有哪些?

席南华:数论正处于一个特别活跃的发展期,重大成果不断涌现,其中黎曼假设与BSD猜想两个千禧问题尚未解决。

朗兰兹纲领是21世纪最重大的数学难题之一,其研究涉及数论、代数群与李群、代数几何、分析等诸多数学方向,已产生5个菲尔兹奖,但中心问题还远未解决。中科院朗兰兹纲领研究团队有成员13人,其中中科院院士2人、国家杰出青年科学基金项目获得者5人。团队成员近年来解决了该方向多个重要猜想。

《中国科学报》:数学与系统科学研究院在建设强国过程中发挥着怎样的作用?

席南华:国家给予了我们很好的条件,包括把数学与系统科学研究院作为体制改革的试点。我们集中精力出成果、出人才、出文化、出思想。减少干扰,尽可能让大家安心做研究,做大的问题。

近30年来,我国数学科学发展迅速,学科布局有了很大改善,研究水平也有惊人进步,在数学多个领域已形成若干有相当实力的科研团队,取得了一批具有重要国际影响的研究成果,在国际上占有一席之地。但从总体上看,我国的数学研究水平与国际一流水平还有差距。

我时常告诉我们的科研人员,在数学与系统科学研究院的工作不仅仅是一份养家糊口的工作,更是一份事业,是让人自豪的事业,关系到我国数学与系统科学的发展。同时,我们也积极向国家和中科院争取项目,从而稳定支持一批高水平中青年科研人员在这里潜心研究,取得重大突破或进展,开辟在国际上有重大影响的数学新方向。

「数论正处于一个特别活跃的发展期」