

# 探索高能量密度“宇宙”中的奥秘

——记国家自然科学基金创新研究群体项目“高能量密度物理若干前沿问题研究”

■本报记者 甘晓

宇宙中绝大多数物质均处于高能量密度等离子体状态,而像地球一样在物质固液气三相的地方却极其罕见。因此,科学家梦寐以求的愿望是在地球实验室里“复制”高能量密度的“宇宙”,以便探索它的奥秘。为此,从超短超强激光技术、超高分辨率实验诊断技术以及复杂的理论与数值模拟等三个维度进行“三位一体”研究是必须的。

中国科学院院士张杰带领的“高能量密度物理若干前沿问题研究”创新研究群体就是这样的“三位一体”研究团队。在连续三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)的支持下,该科研团队在对高能量密度物理奥秘的探索中,取得了一批国际领先水平的研究成果。

## 基础研究最需要梦想

上海交通大学激光等离子体教育部重点实验室是张杰和研究团队的大本营。在这里,“梦想”是使用频率最高的关键词。“探索高能量密度物理世界的奥秘,最需要的是梦想。”张杰告诉《中国科学报》。

新的物理规律和现象,总是在人类探索最极端条件下的物质状态时被发现。挑战高能量密度物理的极限,探索高能量密度“宇宙”中的奥秘,正是张杰研究团队的梦想。

想要在地球上产生极端高能量密度状态并对其中的奥秘进行创新研究,就必须想办法将尽可能大的能量汇聚在极小的时空尺度,这就需要挑战超短超强激光的极限,挑战超高分辨率测量的极限,挑战人类认知的极限。

美国罗切斯特大学的 Gerard Mourou 和 Donna Strickland 1985 年发明的超短脉冲“啾啾脉冲放大”(CPA)技术将超短超强激光的输出功率提升了 100 万倍,使得在大学实验室创造高能量密度物理状态成为可能,他们也因此获得 2018 年度的诺贝尔物理学奖。在创新群体项目支持下,钱列加



创新群体项目成员合影,左六为张杰。  
研究团队供图

教授等团队成员提出了“准参量啾啾脉冲放大”(QPCPA)的新方案,打破 CPA 技术的放大极限,将超短超强激光的放大能力又提高了 10 倍,创造了新的世界纪录,有望将单束超短超强激光推进到前所未有的 10<sup>17</sup> 瓦的极端超功率区域。

群体成员向教授在超快电子衍射方面取得重要突破。他们将加速器领域的双偏转消色差技术与激光啾啾脉冲放大压缩技术结合,将超快电子衍射的时间分辨率提高到优于 50 飞秒,把美国同行保持多年的分辨率世界纪录提高了近 3 倍。这意味着,拍摄超高分辨率的原子电影将成为现实。

在高能量密度物态下的粒子加速方面,群体成员陈民教授通过理论分析和大规模数值模拟研究,提出了一种全新的激光等离子体尾波加速级联方案,有望大幅提升级联耦合效率,为产生 10<sup>11</sup> 电子伏以上的高能电子束提供了可能。

在高能量密度物态演化方面,群体成员在神光 II 实验平台上的研究揭示了全新的磁重联特征,验证了欧洲太空总署卫星的观察结果。此外,群体成员盛政明教授等还研究了太阳内磁重联,解释了相对论强激光与固体靶作用中的超短强磁场以及湍流产生。这

些研究为利用强激光研究天体高能量密度状态的演化提供了全新思路。

对于上述成果,张杰总结道:“以探索高能量密度物理过程最本质的未知为梦想,锲而不舍地三位一体攻关,才能不断发现高能量密度‘宇宙’中的新奥秘。”

## 服务国家战略需求

攀登科学高峰的同时,科研团队牢记服务国家战略需求的使命。在创新群体项目支持下,科研团队将多个研究成果转化应用于国家科技重大专项任务等国家战略需求。

历经 9 年,贯穿整个创新群体项目的三期研究,钱列加教授等研制的创新仪器“强激光脉冲超高分辨率测量仪”从设计构思、基础研究、技术发明成功走向工程应用。

用于探索极端高能量密度物理现象的超短超强激光不仅需要具有高达相对论光强的脉冲峰值,而且还要求背景光噪声低至单光子水平,两者的对比度反差超过 10<sup>10</sup> 数量级。如何仅用单个脉冲一次性测量这种超高分辨率脉冲是强激光领域的世界级难题。张杰表示:“钱列加等人十年磨一剑,

创造性地解决了这个世界级测量难题,实现了 10<sup>11</sup> 的超高分辨率单次测量能力,高于国外报道最好结果 3 个数量级以上。”

更令人振奋的是,这个国际上唯一实用化的超短超强激光脉冲对比度单次测量装置,已经应用于我国拥有的全部超短超强激光装置,为我国战略科技作出了不可或缺的贡献。

此外,“MeV 能量超快电子诊断系统”也已应用于我国激光聚变研究的等离子体电场测量,为解决激光聚变中激光等离子体不稳定性的来源问题提供实验证据。

## “接力”培养“三剑客”人才

在连续三期创新群体项目结题时,张杰发现一个有趣的现象。“我们群体成员的平均年龄并没有增加 9 岁,而是与项目申报时差不多。”原因就在于,研究团队不断吸纳年轻人才加入。创新群体项目不仅为他们从事基础研究提供了宽松条件与创新环境,更使研究团队的人才梯队建设成为可能。

“人才是头等大事。”张杰强调。

2011 年 9 月 29 日,张杰前往美国劳伦斯伯克利国家实验室和加州大学伯克利分校邀请科研成绩突出的青年科学家陈民加入团队。“我向他讲了国家对基础研究的重视,我们的前沿探索急需优秀人才。”张杰一边对陈民说,脑海里一边浮现出多年前的一个类似场景。

时间倒回到 1997 年,张杰还在英国卢瑟福实验室工作时,就已经是高能量密度物理研究领域知名的青年学者。当时的国家自然科学基金委主任张存浩赴英国访问见到张杰。“他说国家发展急需各方面的科技创新,急需青年人才,他的话深深打动了我。”张杰向《中国科学报》回忆道。

在国家自然科学基金委“委主任基金”和杰青基金的支持下,张杰与魏志武等同事建成了国内第一台太瓦级飞秒激光装置和第一批实验诊断

设备,并取得了一系列成果,得到了国际学术界的认可。“现在,培养年轻人的接力棒交到了我的手里。”他说。

张杰、钱列加、盛政明作为这个“三位一体”研究团队中的“三剑客”,引进和培养了一代又一代的“三剑客”,关心他们的生活、工作,引导他们将个人梦想规划在国家快速发展的大局中。

更重要的是,他们培养了一支更加年轻的生力军。除了对研究生的系统培养外,张杰团队还专门在上海交通大学致远学院为本科大三学生开设思维训练课程。为上好这门课,张杰

“集齐”了群体成员,以激光聚变的实际研究内容为场景,以超高的师生比例,手把手培养学生主动探究科研前沿、创造新知识的思维方法。

“我们希望在课堂上把多年科研生涯形成的正确思维方式传授给本科生,让他们真正学会研究型的学习方法,成为未来的创新型领军人才。”张杰指出。

对极端高能量密度物理前沿的探索仍然在继续。张杰相信,随着他们研究的深入,打开高能量密度“宇宙”奥秘的钥匙终会被发现。

## 《中国科学报》:如何产生高能量密度物理状态?

张杰:用一个形象的比方来说明我们所研究的极端高能量密度状态:相当于 15 艘辽宁舰飘起来,压缩到大拇指的面积上所产生的压强,也就是大约 1 百万大气压的压强下所对应的高能量密度。激光技术的突破为高能量密度物理的研究提供了可能。

近年来,高能量密度物理研究取得快速进展的原因主要得益于雷达中的啾啾脉冲放大(CPA)技术引入到了激光领域,使激光强度在 14 年的时间内提高了 100 万倍。而我们团队成员钱列加教授等人在此基础上,将超短超强激光的放大能力又提高了 10 倍,这才使在我们实验室产生极端高能量密度状态成为可能。

## 《中国科学报》:高能量密度物理研究的基本方法是什么?

张杰:高能量密度物理研究需要将理论和数值模拟、超高的时空分辨实验诊断技术以及超短超强激光技术三个方面紧密结合。以我们创新群体项目为例,在理论和数值模拟提出新的概念和方向后,将激光技术和实验诊断结合在一起

创造条件去验证,然后,从实验结果中进一步发现新的物理规律,预言新的实验结果。这样的过程反复进行,才能推动我们对高能量密度物理过程“螺旋式”上升的认识。

## 《中国科学报》:根据您的判断,未来 10 年,高能量密度物理研究的发展方向是什么?

张杰:高能量密度物理研究运动速度非常高的微观物体运动规律,它涉及量子力学和相对论物理等交叉学科应用的很多挑战。狭义相对论适用于速度非常高的物体,而量子力学适用范围则是温度极低、运动速度很小的微观物体。因此,以集体效应为主的高能量密度状态为我们发现新物理规律提供了可能。

高能量密度物理前沿突破还要依赖于超短超强激光技术的发展。我们预计,未来 10 年里,超短超强激光的聚焦功率密度将有可能提高到 10<sup>18</sup>~10<sup>19</sup> 瓦每平方厘米。在这样的光强下,未来 10 年的核心科学问题将是量子电动力学效应为核心的超相对论高能量密度物理。我真诚地邀请更多年轻科研工作者抓住机遇,与我们一起享受在高能量密度“宇宙”中探索奥秘的快乐。

# 造就“象群”型研究团队

——记国家自然科学基金创新研究群体项目“复杂表面与界面体系的新物理”

■本报记者 张双虎

“复杂表面与界面体系的新物理”创新研究群体项目成员将自己喻为“象群”。

“人们常用‘狼群’比喻群体的高效协作,但狼经常会相互竞争。我们 6 个人(创新群体 6 个核心成员)之间关系非常融洽,大家相互学习、相互成就,在分配资源方面甚至有点谦让。”该创新群体项目负责人封东来告诉《中国科学报》,“从这个角度看,我们更像是最近大家关注的云南‘象群’,每个个体足够独立,又能融洽地密切合作,对群内‘幼象’(年轻人)呵护有加。”

过去 6 年中,该群体在表面与界面的新奇超导电性、二维晶体、低维拓扑材料等方向上密切合作,取得了一系列具有国际影响力的创新性成果,形成了一个具有国际竞争力的不断产出原创成果的研究群体。

## “围攻”表面与界面

“我们 6 个课题组之间‘三三、两两合作’特别多。”封东来说,“张远波是二维材料研究领域的专家,李世燕是极低温超导的专家,张童是扫描隧道显微镜(STM)的专家,龚新高擅长计算,金晓峰是磁学和金属薄膜生长的专家,而我一直在用角分辨光电子能谱(ARPES)和氧化物分子束外延研究低维量子材料,我们从不同的角度‘围攻’各种表面与界面中的有趣现象。”

该群体 6 个课题组围绕同一目标,从不同角度“进军”。项目执行中,6 个课题组之间多次相互交叉合作,形成了复杂的“网状交叉”结构。

以黑磷为例,张远波和中国科学技术大学教授陈仙辉合作,首次制备出二维黑磷晶体管,开辟了二维黑磷研究新方向,并观察到整数量子霍尔效应等新奇特性;封东来课题组对黑磷电子结构的测量,则为张远波理解

半导体能带结构提供了重要依据。

FeSe/STO 是中国科学院院士薛其坤课题组发现的一类具有最高超导电性配对的界面超导体系,引起学界广泛关注。张童、封东来、龚新高等合作,像搭积木一样,改变超导界面的不同构成,实现对界面的单原子层精度调控,再进行高精度的 ARPES 和 STM 测量与第一性原理计算,揭示了界面电荷转移与界面电声子耦合共同作用提升超导电性配对的机制,为设计新的超导体打下基础。

“类似的合作很多。”群体核心成员之一、复旦大学教授张远波说,“大家有共同的兴趣,有互补的实验技术,又有共同的想法,协作成为自然而然的事情。”

## 没有边界的实验室

“得益于复旦大学物理学系良好的学术氛围,群体之间能够毫无保留地互相学习、互相帮助,在凝聚态物理这个学科领域不停碰撞出新成果。”封东来说。

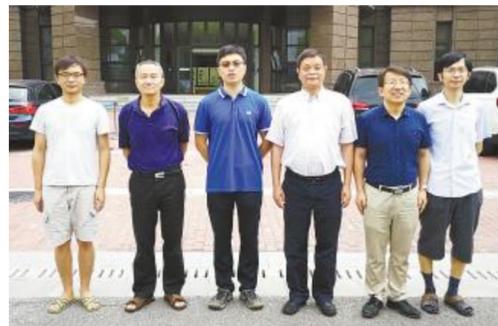
在 Bi/Ni 界面超导研究中,金晓峰做了很多实验,认为这是一个 p 波超导(一个特殊的三重态超导)。但张童的实验发现,它更像是个 s 波(即常规的单态超导)。

为此,从小组间讨论到请外部专家一起分析,大家断断续续“吵”了好几年。大家基于自己的研究和实验,迄今仍然“谁也说服不了谁”。

“这个问题比较复杂,至今仍悬而未决。”封东来说,“金老师曾是物理系主任,可以说是张童的长辈,但‘吵’的时候还是‘吵’,没有人觉得被冒犯,反而因为有人关心相同的科学问题而惺惺相惜。”

各课题组之间的交流和学习是家常便饭。

封东来课题组进行氧化物分子束外延生长,有臭氧退火技术,张远波课题组在做铜氧化物高温超导材料研究



从左至右:张远波、金晓峰、封东来、龚新高、李世燕、张童。  
研究团队供图

时,向封东来学习了臭氧退火处理技术,成功实现了最薄的高温超导材料;张远波和陈仙辉合作开发出固体离子门电极调控材料技术,李世燕通过和他们合作掌握了这项技术,把它用到铁基超导材料研究中,发现了一种分立的超导相图;李世燕是用稀释制冷机进行低温热输运测量的专家,他的经验帮助张童建成目前电子温度最低的稀释制冷 STM,为张童对马约拉纳零能模的研究打下基础;而张童帮助封东来在分子束外延系统上加装了 STM,这样就可以直接原位观察生长出的薄膜表面质量,极大促进了 FeSe/STO 界面超导研究进程。

“这样我们就形成了一个闭环,每个人都无私地公开自己的‘绝活’,经过群体 6 年的合作,所有课题组都更强大了。”封东来说。

不只群体里 6 个学术带头人受益良多,他们的不少学生——这些“幼象”们,也“至少掌握了两手手艺”。

“老师们都很忙,不能天天在一块儿讨论,但各个实验室学生间的交流非常多。我的学生经常跑到东来实验室,跟他们讨论,用他们的设备,学他们的技术。”张远波说,“我也经常看到

其他群体成员的学生过来用我们的仪器,和我们讨论。”

“通常学生进其他老师的实验室,至少要经过老师的同意。因为我们在一个群体中,老师和同学接触较多,学生们互串实验室不需要跟老师打招呼,实验室变得没有边界,大家自由出入、免费使用。”该群体核心成员之一、复旦大学教授李世燕说。

“我们的学生互相熟悉,接触面也特别广,不少学生得到两三个组的培养,甚至成为两个导师的‘学术后代’。”封东来说,“这对他们未来进行交叉创新、开展自己的研究非常有帮助。”

## 不是一个人在“战斗”

封东来用“安全感”来描述对国家自然科学基金的感受。

“科学基金评审过程公平公正,绝大部分评审专家都很专业,工作人员为人也很‘端方’,让我们感到踏实。”封东来说,基金是一个很好的黏合剂,把大家凝聚在一起。作为连续 6 年资助的人才类项目,创新群体项目不看短期效益,能够通过某个方向的长期培养以及群体的协同作用,

解决一些前沿的重要问题。

“我研究的每个重要节点背后都有科学基金的支持。”张远波说,“刚回国就得到一个重点项目,我们实验室也是在此基础上搭起来的,后来做出第一批成果,包括黑磷材料的成果都有基金的支持。可以说基金是‘雪中送炭’。”

李世燕认为,通过科学基金的这些项目,和其他人,其他团队有了很好的合作,最后一起做出成绩,这让人感觉“不是一个人在单打独斗”。

张童作为群体中的年轻人,得到群体其他成员的长期关照。他表示,科学基金的持续支持与群体成员间高效的协作,极大促进了自身成长。

## 《中国科学报》:复杂表面与界面体系的新物理研究,有哪些重要科学意义或应用场景?

封东来:我们主要关注表面、界面等体系里新的物理现象,进行凝聚态物理基础理论和实验研究。科学家更关心的是这个体系里有趣的物理现象,这些现象和材料可能在遥远的未来,在信息、能源等领域有重要应用。

就像在海边捡贝壳,我们选了一片沙滩,或许这里有较多的贝壳。比如,量子计算的优越性未来可能会在材料设计等领域带来深刻变革,量子计算有多条可能的实现路径,而基于马约拉纳零能模的拓扑量子计算是其中很有希望的一条。同样,黑磷材料具有特殊的半导体性质,将来可以在化学、材料、能源领域有很好的应用。但目前这些都还处于基础研究阶段。

## 《中国科学报》:在凝聚态物理领域,这支队伍目前处于怎样的

水平?

封东来:项目执行中,我们取得了一系列具有国际影响力的成果,其间发表文章 130 余篇,其中多篇发表于《自然》《科学》《物理评论快报》等。这支队伍在国际上也有了席之地,多位成员在国际上的委员会、学会、期刊担任主席、会士、委员或编辑。

## 《中国科学报》:听说群体项目经费会向年轻人倾斜,这是怎么回事?

封东来:我们有一套“自己的逻辑”,就是公共性质的经费一定要让年轻人“吃饱”。

三四十岁是一个人创新能力、创造激情的“黄金时期”,要确保这个年龄段的人不会因为经费而限制了创造力。在我们群体里,只要年轻人开口都尽量满足。在项目上,不只 6 个学术带头人在成长,我们还培养了 46 名博士,其中不乏超级博士后、复旦学术之星、国家“博新计划”获得者。