

大科学工程中技术科学家的角色与激励

——以大亚湾中微子实验中液体闪烁体技术的开发为例

**The Role and Incentive of Technical Scientists in Large-scale Science Projects:
Based on the Research Process of Liquid Scintillator in Daya Bay Reactor Neutrino Experiment**

王聪 /WANG Cong 蒋姊宣 /JIANG Zixuan 王大洲 /WANG Dazhou

(中国科学院大学人文学院, 北京, 101408)
(School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 101408)

摘要: 大科学工程离不开技术科学家的深度参与。本文以大亚湾实验中的关键技术——掺钆液体闪烁体技术研发为例, 采用访谈和文献分析方法, 考察了技术科学家在大科学工程中扮演的角色和特征。研究表明, 技术科学家跨越了技术人员和科学家的传统边界, 在技术和科学两个领域都具备贡献性技能; 当前我国学术界的科研人才评价存在重科学轻技术倾向, 降低了技术科学家参与前沿技术研发的意愿。在这种情况下, 大学和科研机构应采取“分类评价, 平等对待”的思路, 为技术科学家提供平等的职业发展空间; 政府也应该采取措施, 激励技术科学家积极参与大科学工程建设。

关键词: 技术科学家 角色 大亚湾中微子实验 掺钆液体闪烁体

Abstract: Technical scientists play an increasingly important role in large-scale science projects. Taking the development of gadolinium doped liquid scintillator technology, a key technology in the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment, as an example, this paper examines the roles and the characteristics of technical scientists based on the development process of key technologies for large-scale science facilities, using both interview and literature research methods. It is found that technical scientists have both practical and theoretical expertise, crossing the traditional boundary between technicians and scientists, with contributory expertise in both technical and scientific fields. However, the tendency of the current research talent evaluation system in China to emphasize science over technology reduces the willingness of technical scientists to participate in cutting-edge technology R&D. In such situations, the idea of “categorical evaluation and equal treatment” should be adopted at the level of universities and research institutions, which is able to provide technical scientists equal upward mobility. The government should also take measures, in order to encourage willingness of technical scientists to participate in the process of large-scale science facilities construction.

Key Words: Technical scientist; Role; Daya Bay Reactor Neutrino Experiment; Gadolinium doped liquid scintillator

中图分类号: N02; C02 文献标识码: A DOI: 10.15994/j.1000-0763.2024.11.012

基金项目: 国家社会科学基金重大项目“技术创新哲学与中国自主创新的实践逻辑研究”(项目编号: 19ZDA040); 中国科学院政策调研课题“基础研究的理论与政策研究”(项目编号: ZYS-2021-09)。

收稿日期: 2023年11月16日

作者简介: 王聪(1985-)女, 吉林长春人, 中国科学院大学人文学院副教授, 研究方向为科学传播。Email: wangcong@ucas.ac.cn

蒋姊宣(1999-)女, 湖南宁乡人, 中国科学院大学人文学院硕士研究生, 研究方向为科学传播。Email: jiangzixuan20@mails.ucas.ac.cn

王大洲(1967-)男, 河南鲁山人, 中国科学院大学人文学院教授, 研究方向为工程哲学与科技政策。Email: dzwang@ucas.ac.cn

随着科学研究变得越来越复杂,技术人员已经从“仆人”、^[1]“助手”、^[2]仅仅做服务性工作的人、^[3]不值得被关注和记录的人,^{[4]-[6]}演化为科学研究中不可缺少的组成部分。^{[7]-[8]}有人将技术人员的角色分为缓冲者和中介者两类,^[9]前者沟通的是物质世界和表征世界,将实物样本转化为数据或图表,供其他职业群体(如科学家、医生、工程师)完成自己的工作,后者沟通的是技术系统与客户群体,为客户顺利使用技术系统提供维修和维护方面的支撑。^[9]科研机构中的技术人员同时承担着上述两种角色,是科研工作中不可或缺的存在,但由于其工作辅助性与不可见性的特点,他们在科研机构的待遇和地位往往不高,^[10]由此导致了技术人员对科学研究的重要作用与较少受到足够承认之间存在矛盾。^{[11], [12]}

随着大科学时代的来临,科学研究越来越依赖于大科学装置。大科学装置的建造离不开极为特殊的非标设备或材料,因此需要进行尖端技术的研发。而要研发此类尖端技术,技术人员需要具备较高的理论水平。也就是说,大科学工程建设不仅需要具有丰富实践经验的技能型技术人员,更需要在特定学科领域接受过专门训练、了解学术前沿并具有足够实践经验^[13]的技术科学家。本文中的技术科学家,指的是既具备技术能力又在科学领域接受过系统学术训练,因此具备技术和科学两个领域贡献性技能(contributory expertise)^①的群体。^{[14]-[17]}虽然表面上看,大科学工程中的技术科学家似乎只是一类作为中介者的技术人员,但与传统中介者固守既定技术专长、仅从技术共同体中“搬运”已有技术成果不同,技术科学家需要为用户“定制”新的知识或新的人工制品,因而超越了纯粹的中介者角色。如果说传统技术人员通常长期服务于并隶属于某一组织或某一领域,而作为既能在大科学工程中进行尖端技术研发又能在特定科学领域从事高水平科学研究的技术科学家,更有可能选择拒绝这种从属身份,不愿意承担此类关键技术研发任务。因

此,探讨在大科学工程建设中技术科学家的相关激励机制就显得十分必要了。

目前关于大科学工程的人文社会科学研究主要集中在三个方面:其一,从历史视角关注大科学装置的建造历程;^{[18]-[21]}其二,从管理视角关注大科学工程的治理问题,如大科学工程中的国际合作、^{[22], [23]}科学共同体的组织等;^[3]其三,从政策视角关注大科学装置对其他社会领域的影响。^{[24]-[27]}可见,关于技术科学家在大科学工程中发挥的独特作用和角色冲突问题尚未得到专门探讨。因此,本文将以大亚湾中微子实验中的液体闪烁体技术(后简称“液闪”技术)研发为例,采用访谈和文献分析研究方法,考察技术科学家在大科学工程中扮演的角色、面临的角色选择问题以及相关制度因素,以期相关政策制定提供理论支撑。

由中国科学院高能物理研究所(后简称高能所)主导的大亚湾中微子实验是我国基础研究领域迄今为止最大的国际合作型大科学工程,取得了举世瞩目的世界一流实验成果,而掺钆液体闪烁体技术研发对于此项实验装置的建造以及实验领导权的分配都具有至关重要的价值,可以说在某种程度上决定了此项实验的成败。在这个过程中,技术科学家的重要性、特征和面临的角色选择问题得到了比较充分的暴露,而高能所的制度设计则在一定程度上缓和了整体制度环境对技术科学家的制约,有利于激励技术科学家积极参与大科学工程建设和运行。从这个意义上说,大亚湾中微子实验“液闪”技术研发案例具有典型意义,可望从中总结出关于技术科学家角色定位及制度安排的新认识,从而为相关政策制定提供理论支撑。

一、大亚湾反应堆中微子实验与液闪技术

自从上世纪30年代泡利预言中微子存在之后,科学家们围绕中微子开展了一系列研究。到本世纪初,科学家们发现并证实了中微子振

①贡献性技能指的是长期沉浸在特定领域而获得的能够为该领域发展做出贡献的技能。

荡现象的存在,并陆续发现了三种中微子振荡模式中的两个,只差最后一个混合角 θ_{13} 还未被准确测量。21世纪之初,一些国家的研究团队陆续提出了测定 θ_{13} 的实验方案,高能所相关团队也有这个意向,并和美方一些团队讨论合作事宜,并最终形成多个国家参与的大亚湾中微子实验国际合作框架。

作为我国基础研究领域迄今为止最大的国际合作项目,大亚湾中微子实验除了国内一系列相关机构的支持之外,还获得了美国、俄罗斯等五个国家和地区的经费支撑和众多科学家的参与,^[28]而中国和美国是该实验最主要的参与方。

2007年10月,大亚湾实验装置开工建设。到2011年年中,“逐步完成探测器的建造与安装”^[29]并于当年12月下旬正式开展取数。^[30]大亚湾实验在管理方面,主要由科学和工程两套班子组成。在科学方面,早在项目立项之前的2005年,中美双方就建立了合作组,双方各有一位发言人(Spokesperson),发言人的角色相当于国内的首席科学家,负责科学方面的决策,下设执行委员会(Executive Board)。在工程方面,领导者为项目经理(Project Manager),下设技术委员会(Technical Board),负责经费与执行。中方与美方的两套科学与工程的管理系统负责该项目的建设 with 实验。2012年3月8日,大亚湾核反应堆中微子合作组宣布,利用6个探测器运行55天观测到的数据,发现了中微子的第三种振荡模式,并测得混合角 θ_{13} 。^[31]2012年底,大亚湾核反应堆中微子实验成果入选美国《科学》杂志2012年度十大科学突破。^[32]2015年11月,研究中微子振荡的7名领导者及他们领导的5个研究团队获“基础物理学突破奖”,其中王贻芳领导的大亚湾反应堆中微子实验项目也获此殊荣,这是中国科学家和以中国科学家为主的实验团队首获该奖。^[33]2016年,“大亚湾反应堆中微子实验发现的中微子振荡新模式”获得国家自然科学奖一等奖。

大亚湾中微子实验的中心探测器采用的是含有0.1%的稀土元素钆的掺钆液体闪烁体(液

闪)作为俘获中微子的靶物质,而掺钆液闪技术是影响探测器性能的关键。中微子探测器的作用是俘获和记录中微子,也是整个实验得以运行的基础,预算中的大部分经费都投入到中微子探测器的建造。在3个实验大厅共放置了8台中微子探测器,每台探测器高5米、直径5米、重110吨(其中20吨为掺钆液闪),均置于10米深的水池中。^[28]作为靶物质,掺钆液闪是中微子探测器的核心部分。利用中微子进入液闪所引发的反 β 衰变反应,探测器就能探测中微子。如果液闪出现问题,就会直接影响探测器对中微子的探测,从而影响实验的成败和寿命。法国的CHOOZ中微子实验就因为掺钆液闪透光率下降而不得不提前终止。^[34]中国科学家研发的掺钆液闪,其光学透明度好、发光效率高、安全、低毒、放射性和化学杂质含量低、长期稳定并与容器兼容,因而保证了实验的顺利进行。鉴于大亚湾中微子实验是国际合作项目,美国能源部承担了一半的探测器研制费用,中方和美方在实验合作中存在一定的内部竞争,而中方在掺钆液闪配方研制上的成功,也为中方在实验中发挥主导作用添加了至关重要的砝码。

二、液闪技术研发过程中技术科学家的特殊贡献

1. 物色技术科学家

在大亚湾实验立项之前,项目负责人王贻芳就意识到掺钆液闪技术决定着整个大科学装置的成败,安排参与前期筹划工作的高能所青年物理学家曹俊提前启动,着手相关研究。研发具有长期稳定性的掺钆液闪配方是一个化学问题,生产160吨则是一个化工问题。找到具有此类专长的技术科学家参与其中成为了解决问题的关键。曹俊首先想到的是专业研究所和大学的科研人员,但却发现很难说服他们认同掺钆液闪技术研发是值得攻克的学术问题。曹俊也曾尝试与企业界的相关技术人员联系,有一家公司的退休老工程师同意合作,并开始着手设计技术路线。但后来发现,作为一位传统

的技术人员,这位工程师并不具备足够的理论知识与相关技能,于是合作被迫终止。

2005年1月,大亚湾实验中方主要负责人召集高能所相关科研人员座谈。曹俊在会上介绍了中微子实验计划以及遇到的困难,特别是掺钆液闪研制上的被动局面。高能所核分析室的张智勇^①副研究员也参加了此次会议。他本科和硕士阶段从事稀土配位化学研究,博士阶段研究方向是核药物化学。他觉察到掺钆液闪制备的关键在于寻找合适的有机配体,以制备溶于液闪溶剂的稳定的钆络合物,而自己的学科背景,恰恰最适合于开展此项工作。^[34]当时大亚湾实验还未立项,能够提供给此项研究的经费非常有限;一旦研制失败,不但会拖累整个实验进程,还会耽误个人学术发展;而且,参加这项研究,就意味着暂别他正在从事的热门方向——纳米生物效应研究。尽管如此,张智勇第二天就主动提出愿意承担此项工作。

2. 技术路线的选择

最初大亚湾国际合作组有三个团队参与掺钆液闪的研制,分别来自俄方杜布纳联合核子研究所(JINR)、美方布鲁克海文国家实验室(BNL)、中方高能所。三方采用背靠背并行研究方式,在竞争中胜出的方案将最终被采用。俄方团队因为研制的钆络合物在液闪溶剂中的溶解度不达标而早早退出竞争。^[34]

美方小组是布鲁克海文国家实验室的中微子与核化学组,由发现太阳中微子的2002年度诺贝尔物理学奖获得者雷蒙德·戴维斯(Raymond Davis)建立,该团队长期参与中微子相关实验,在液闪制备方面具有世界领先的能力。^[35]他们具有核化工背景,沿袭湿法后处理流程的思路,采用液-液萃取,一步完成掺钆液闪的制备。具体步骤为,首先将钆盐溶解于水,有机配体溶于液闪溶剂,将两者混合振荡,钆离子与有机配体结合,从而使钆从水相进入有机相。这个思路的优点是可以一步完成,但缺点也比较明显,就是缺少纯化的过程,水相中的杂质以及有机溶剂中未能结合钆的过量

配体均不能被分离,可能影响到掺钆液闪的稳定性。尽管如此,该小组仍然坚持该技术路线。

既然是并行研究,如果和美方采取相同路径就没有意义,因此中方小组采用了不同的探索方向。20世纪70-80年代我国曾经研制过中子探测器,其中需要掺钆液闪,^[36]但相关探索到上世纪80年代中期逐渐停止。当时中国学者的相关工作已经接近国际水平,而且后来大亚湾实验所需掺钆液闪的研制思路与此类似,但由于掺钆液闪应用范围窄,没有足够的收益支撑,且当时国外公司已经能够实现大规模生产从而降低了价格,这些原因导致了我国相关研究的中断。因此,当大亚湾实验需要高性能的掺钆液闪时,我国科学家不得不从头做起。

作为中方研发小组的组长,张智勇主张采用两步制备法,就是先获得钆的有机固体配合物,经过纯化,再配制掺钆液闪。之所以如此选择,是因为在配位化学中,只有获得比较纯净的目标化合物,才能开展后面的分析和测试,从而了解物质的结构与特性。与美方思路相比,这一思路虽然分成两步,但是优势也比较明显,能够有效减少杂质,保障液闪的稳定性,而掺钆液闪的稳定性对于整个实验来说至关重要。

由于缺乏相关经验,中方小组首先对已有文献进行仔细研读,梳理出三类共10种可能的配体。之后,课题组用各种配体,按照两步法制备掺钆液闪,并对样品的重要特性进行检测和比对。他们发现,候选的三大类配体各有优劣: β -二酮类配体能够和钆形成相对稳定的络合物,但缺点是溶解度比较小,有些可能会有颜色,影响透明度;有机膦类配体和钆形成的络合物溶解度相对较好,但由于自身分子量比较大,能够掺入的钆的量较低;有机羧酸类配体的溶解度较好,但稳定程度不如 β -二酮类配体和有机膦类配体。鉴于大亚湾实验需要制备大量掺钆液闪,配体选择还需要顾及大规模制备的可行性,特别是市场上相关原料的纯度是否能够达到实验要求。在对溶液透明度、溶解性、稳定性、对发光物质发光效率的影响、大

^①2021年12月3日,张智勇研究员于北京接受了作者访谈,提供了掺钆液闪研发过程的信息。

规模生产的可行性等方面的优劣进行综合考虑、反复权衡的基础之上，中方团队最终选择有机羧酸类的3, 5, 5-三甲基己酸为配体，并将PPO（2, 5-二甲基噁唑）作为第一发光物质，bis-MSB[对-双-(σ -甲基苯乙烯基)苯]作为第二发光物质。^[34]

恰在此时，中美双方团队在一次学术会议上获悉，加拿大萨德伯里中微子观测站的科研人员发现了一种性能更好、更加环保、成本较低的新溶剂——直链烷基苯。由于大亚湾实验最终需要配制出总重近400吨的掺钆液闪和普通液闪，成本控制当然是重要事项，而在实验结束之后如何处理这些液体，也同样重要。考虑到直链烷基苯的成本优势和环保性，中美双方一致决定采用这一常规的化工原料作为制备液闪的新溶剂。之后，中方团队又对一些有利于提高性能的添加成分开展了一系列探索，最终成功研制出具有高稳定性、安全性、透明性、发光率且易于生产的掺钆液闪。

3. 中美研究小组成果的评判

在并行研究的后期，中美双方开始互换样品。中方小组在检测对方样品之后，就意识到美方样品的性能不是很好。美方原来选择的配体与最初的溶剂三甲苯是匹配的，但是将直链烷基苯作为新溶剂之后，这种匹配性就出了问题。而中方小组虽然动手稍晚，但是选择的配体碳链较长，因此在新溶剂中的溶解度较好。中方小组指出了美方样品存在稳定性问题后，美方也选择了3, 5, 5-三甲基己酸作为配体，但仍坚持一步制备法。在决定采用哪种方案前，经合作组同意，由香港大学的一个研究小组作为第三方对双方样品做评判测试。

2007年6月底，中美双方各派研究人员到香港大学实验室现场合成50 L掺钆液闪，再由香港大学团队通过高温加速老化的方式来测试双方掺钆液闪的各项性能。2007年8月，实验结果公布，中方样品在衰减长度这个最重要的性能指标上表现出随时间首先上升之后缓慢下降的轨迹，而美方样品的衰减长度^[34]则呈现出很快下降的趋势。这个实验确认了中方小组的方案更好，因此中方掺钆液闪配方最终被大

亚湾实验采用。

在国际科研合作中，贡献大小是能否获得主导权的重要依据。贡献可分为人力、经费、技术三个方面。其中，人力主要指各方团队的实力特别是带头人的领导力，涉及学术水平、学术眼光、沟通能力等；经费主要指能够为合作项目动员来的经费数量；而技术主要指对关键技术的贡献大小。在大亚湾实验中，中美双方的团队领导能力相当，双方在探测器上的经费投入也大体平衡，因此，影响主导权的重要筹码就体现在技术方面。大亚湾实验涉及多项关键技术，但掺钆液闪是大亚湾实验中最核心、风险最大的技术。之前曾有中微子实验因为掺钆液闪出现问题而未到达预期的物理目标。就大亚湾中微子实验而言，实验的工期和造价都与掺钆液闪的研制进展高度相关。且如果因为配方或者生产流程中的问题使液闪性能变差会导致整个实验失败。因此，中方小组对掺钆液闪配方和制备的贡献为中方获得对整个实验的主导权起到了至关重要的作用。

之后的大规模制备过程还涉及一系列繁复的、要求极高的工作，但中方团队很好地完成了相关任务。为了做好原料纯化工作，高能所科研人员甚至需要到生产厂里与技术人员一同研究纯化过程。对于每一个批次的原料成品，还要进行十分严格的检测。由于液闪用量较大，大约需要50批次、每批次3.7吨的成品，研究团队需要在每次制备后反复检验，保证各个批次之间的纯度保持一致。后来，大亚湾研制的掺钆液闪由于透明度好、稳定性高，还得到了俄罗斯和日本其他研究团队的认可并实现了出口。

三、大科学工程中技术科学家的角色特点与激励问题

1. 大科学工程中技术科学家的角色特点

技术科学家是既具备技术能力又在科学领域接受过系统学术训练因而具备技术和科学两个领域的贡献性技能的科学家。同时具备技术和科学两个领域的贡献性技能，是技术科学家区别于传统科学家、技术人员和工程师的重要

特征。

正因为同时具备两种贡献性技能,技术科学家可以同时承担技术人员和科学家两种角色。一方面,技术科学家作为技术人员,具备足够的经验技能,如在掺钆液闪研发过程中考虑溶液透明度、溶解性、稳定性、发光效率,根据经验和大亚湾实验的特别要求选择合适的配体和发光物质,要考虑成本优势、环保性以及配体与已有化合物的匹配性。另一方面,技术科学家作为科学家,具备足够的理论素养,如在掺钆液闪研制中就需要放射化学、稀土化学方面的知识,而且在探索性的研发过程中,需要基于现有理论寻找可行解题路径,而这就要求他们接受过较为系统的学术训练。

技术科学家是跨越传统技术人员和科学家职业边界的特殊群体,面临着特殊的科研评价问题。一般而言,技术人员的职责是定制知识,创造和维护技术系统,主要关注实践价值,其工作评价标准是看是否研发出适用的技术制品,而科学家关注研究工作的理论价值,其研究工作的评价标准是所生产的知识是否获得同行承认。对于掺钆液闪研制这类科研活动而言,尽管必须依靠具有理论素养的科学家而不是一般的技术人员解决问题,但完成此项任务通常难以带来足够的学术承认。掺钆液闪研制在化学领域并没有足够的学术价值,研究成功不会为特定科学家在化学领域带来很高的学术声望,而在高能物理领域,掺钆液闪研发只是解决了一个技术问题,因此他们也很难在该领域获得较高的学术承认。这种“两不认”的“激励困境”正是技术科学家必须面对的。他们一方面具有技术能力,另一方面又具有较高的理论研究素养,解决此类问题又非他们莫属。这种情况在大科学工程建设领域可谓比比皆是,诸如兰州重离子加速器装置大科学工程建设中所需众多非标设备的研制,都需要技术科学家的深度介入。^[19]

2. 大科学工程中技术科学家面临的负向激励

在大多数大学和以基础研究为导向的研究机构中,科学家角色是主流,无论是显性承认(资助制度、人才评价制度、科学奖励制度)还是

隐性承认(获得尊重、自我价值的实现等)往往是围绕科学家角色进行设计。一些高校在管理过程中也存在着明显的“重理论轻技术”的倾向。^{[13], [37]}可以说,我国现有科研环境不仅不鼓励技术科学家积极承担掺钆液闪研制这类研发项目,甚至可能进一步降低了技术科学家参与此类技术研发的意愿。

具体而言,在显性承认的部分,主要表现为三个方面的“负向激励”:首先,现有资助制度不利于技术科学家参与此类课题。在基础科学类资助方面,像掺钆液闪这类新技术的研发工作虽然对于特定领域的理论知识生产是不可或缺的,但由于研发活动本身与这类理论知识生产之间的关系较为疏远,因而较难获得基础科学类的基金资助。有学者对国家自然科学基金委员会近20年资助技术类人员的情况进行了统计,发现虽然整体呈上升趋势,但是技术类人员承担自然科学基金项目所占的比例仍非常低,不足1%。^[38]而在应用类资助方面,掺钆液闪技术目前仍未有大科学工程之外的明确应用前景,因此不易获得应用研究方面的资助。从技术科学家的角度看,参与技术研发不仅需要投入材料费、差旅费、检测费等直接花费,还需要分担一般性成本,如实验场地和办公场所的租用费、研究生的日常补助等,尽管相关研究经费在一定范围内可以从大科学工程预研经费列支,但从实践上看此类经费量较难满足课题组运行的需要,这就在一定程度上降低了技术科学家的参与意愿。此外,由于获得某些级别以上的资助本身已经成为人才评价的指标之一,因此,参与此类技术研发较难从研究机构认可的经费来源获得持续资助,这势必影响技术科学家的参与意愿。

其次,现有人才评价制度不利于技术科学家承担此类技术研发任务。在高被引学术期刊上发表文章是职称晋升和提高学术声望的重要指标,发表一定数量的文章也是研究生毕业的硬性要求。处在这种评价体系中,技术科学家更可能选择有更高学术价值的、有利于发表高水平文章的科学研究工作,而不是选择较难在高被引学术期刊上发表论文的技术研发类工

作,这种选择偏好也能够从掺钷液闪研制早期寻找合作团队较为艰难的过程中得到印证。而这一问题在目前大科学技术人才队伍中普遍存在,包括技术科学家在内的技术人员因较难产出论文等理论性成果,在职称晋升方面劣势明显。^[39]在待遇方面,也存在着同等级别技术科学家的薪资明显低于教学科研岗的情况。如华中科技大学国家脉冲强磁场科学中心需要技术科学家负责大科学装置部件的研制工作,但他们在薪资方面明显低于同等级别的教学科研岗人员,^[39]不利于保持一支高水准技术科学家队伍。

最后,在科学奖励制度方面,大科学工程中的技术科学家也处于不利地位。技术和工程领域的专家为了获得科技奖励,甚至需要把与应用成果关系不大的理论强行捆绑在报奖材料中以满足评奖的要求。^[40]国家自然科学奖的性质是个人奖项,每项申报人数最多不超过5人,大科学工程中的技术科学家一般难以进入这个名单,例如国家自然科学奖一等奖成果“大亚湾反应堆中微子实验发现的中微子振荡新模式”的获奖人是5位高能物理专家,并不包括液闪技术的发明人。对于报奖人数的限制虽然能够在一定程度上提高奖励的含金量,但这种限制忽视了大科学在知识生产组织方式上的明显特点。大科学装置的建设和运行离不开学科背景各异的技术科学家的鼎力支持,其知识生产组织方式与“小科学”迥然有别。科学奖励制度对这种研究方式差异性的忽视以及在报奖人数上的限制,势必造成技术科学家的作用被系统性低估,从而无形中对他们形成“排挤”效应。不仅如此,大科学工程中的技术突破是典型的小众技术,应用范围多数情况下聚焦于有限的领域,其价值主要体现在对科学研究的支撑作用,因此其经济价值、军事价值等一时难以做出判断,在这种情况下,也难以单独剥离出来,申报国家发明奖、国家科技进步奖等奖项。

在隐性承认部分,技术科学家参与意愿容易受到组织文化氛围的影响。由于显性承认通常围绕科学家角色进行设计,隐性承认也往往相应表现出“不友好”的局面:不是将技术人员

看作平等的合作者,而是看作可以命令指挥甚至呼来喝去的辅助人员。这种文化氛围往往让技术人员产生一种不受尊重、缺乏自主、难以实现自我价值的感觉。一项针对包括技术科学家在内的高校实验技术类人员的调查显示,没有任何被调查者对周围工作环境感到满意。^[41]但是我们知道,综合素质越高的群体,其获得尊重和实现自我价值的诉求也就越强烈。^[42]技术科学家同时具备对技术和科学两方面的贡献性技能,如果技术科学家在组织文化氛围中得不到足够尊重或者难以实现自我价值,他们更可能选择隐性承认更高的科学家角色。

3. 高能所科技人才分类评价中的激励相容

技术科学家在制度环境中的劣势不利于吸引和激励技术科学家参与大科学工程。而高能所张智勇研究员之所以还愿意承担掺钷液闪技术的研制,一方面是出于对所在组织重要工作的责任意识和甘愿付出的科技报国情怀,另一方面也与高能所本身人才评价中的激励机制设置直接相关。

众所周知,高能物理研究离不开大科学装置的支撑。高能所从20世纪70年代初以来,就致力于大科学装置的谋划和建设,迄今建成和在建的大科学装置已经有十余项。其中,北京正负电子对撞机、中国散裂中子源、大亚湾中微子实验是人们耳熟能详的例子。承担如此之多的大科学工程建设任务,就需要大量技术科学家的积极参与,因此高能所管理者很早就意识到人才评价存在的问题,并逐步形成了科技人才分类评价的做法,即将科研人员分为理论类和工程类。对于前者的评价主要基于高水平文章的发表,对于后者的评价主要基于是否完成相关技术任务以及是否达到技术指标等要求,并不特别强调论文产出。技术科学家可以在两个系列中自愿选择,且两个系列同级别职称人员在待遇上并无差别。技术科学家,既可以选择研究员系列,也可以选择工程师系列。

这一评价思路赋予了实践类的技术成果形式和理论类的科学成果形式相同的权重,纠正了现有科研制度对于不同专业人员的歧视问题,减少了评价机制对于技术科学家的限制,有利

于激励技术科学家参与大科学与工程相关的技术研发工作,从而达成了纯粹科学家和技术科学家之间的“激励相容”。对于纯粹进行理论研究的研究机构来说,对科研人员开展基于单一理论性知识成果的评价,总体上是恰当的。但是,大科学工程的建设和运行离不开众多“异质性”科研人员的共同参与,这些来自众多领域的专家均对大科学工程的建设和运行做出了难以替代的贡献,他们的贡献不仅包括理论知识,还包括研发的技术、研制的设备、安装和维护的技巧等。在这种情况下,主要基于理论性知识成果形式的评价体系,自然就会严重忽视其他类型的贡献,从而产生“歧视效应”。技术科学家具备科学领域的贡献性技能,能够在其中产出理论性知识,这种贡献在该领域中可以得到较高等度的认可,但是当它们运用自己的理论认识在大科学与工程领域中做出技术性贡献的时候,这些贡献则得不到足够的认可,这种情况不容易激励技术科学家积极参与大科学工程建设。高能所之所以是一个例外,就在于通过改进人才评价机制,较好地扭转了技术科学家面临的不利局面,能够为他们提供明确的职业发展路径和平等的上升空间,塑造了理论科学家与技术科学家平等合作,相互尊重的文化,从而有利于吸引并维持技术科学家对大科学工程的参与。

但是,作为一家科研机构,高能所只能在自己可以掌控的范围进行相关制度变革并营造尊重技术科学家的文化氛围,激励所内技术科学家参与大科学与工程,但难以影响外部的资助制度和科研奖励制度等。随着以跨学科和超学科为学科框架、以异质性为知识生产者特征的知识生产模式Ⅱ^[43]在一系列科学领域中逐渐流行,有必要对国家层面的科研制度做出必要调整和改进,以更好地适应这一变化。只有这样,我国蓬勃开展的大科学工程项目才能得到源源不断的技术科学家的加盟和倾力支持。

结 论

现代科学是实验科学,因而离不开实验仪

器。特别是原创性基础研究,不仅需要市场上可以买到的通用科学仪器,更需要全新科学仪器设备的创制,而大科学装置通常正是为原创性基础研究而生的。在我国日益强调基础研究重要性的今天,充分重视技术科学家在大科学装置研制中的关键作用,已经势在必行。

通过对掺钆液闪发展过程进行分析,可以发现大科学装置关键技术的研发离不开同时具有技术能力和理论分析能力的技术科学家。技术科学家具备技术与科学两个领域的贡献性技能,跨越了传统技术人员和科学家职业边界。由于这两种角色的工作目标和评价标准有明显的区别,且现有制度环境对于实践和理论两种成果形式存在区别性对待,因此现有制度环境难以有效激励技术科学家积极担负此类尖端技术研发工作。此类问题在其他大科学工程建设中也比比皆是。^[19]

因此,有必要从两个层面对已有科研制度进行调整,以激发更多技术科学家积极参与大科学工程建设与运行。在科研组织层面,应该完善人才评价制度,塑造尊重技术科学家的组织文化氛围,鼓励技术科学家参与关键技术的研发。特别是在职称晋升上,应该给予技术科学家更多的选择,既可以选择工程师系列,又可以选择研究员系列,并赋予技术研发成果和学术文章同等的地位。在国家层面,应该完善相关资助制度,鼓励技术科学家参与开发“专精特新”之类的小众技术,一方面对学术声望高的科研组织给予稳定的经费支持,使它们有足够资源和自主性开展此类技术的研发和积累;^[44]另一方面适当提高各级各类资助机构对此类技术研发的支持力度,设立面向科研院所、大学和企业的特别研制项目。与此同时,还应当适当放宽国家级科学奖励报奖人数的限定,给予大科学工程中的技术科学家更多获得同行承认的机会,以激励他们更加积极地投身于大科学工程建设。

[参 考 文 献]

- [1] Shapin, S. 'The Invisible Technicians. American Scientists'[J]. *American Scientist*, 1989, 77(6): 554-563.
- [2] Katz, S., Martin, B. R. 'What is Research

- Collaboration?'[J]. *Research Policy*, 1997, 26(1): 1-18.
- [3] Knorr-Cetina, K. *Epistemic Cultures: How the Sciences Make Knowledge*[M]. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1999, 216-240.
- [4] Russell, N. C., Tansey, E. M., Lear, P. V. 'Missing Links in the History and Practice of Science: Teams, Technicians and Technical Work'[J]. *History of Science*, 2000, (38): 237-241.
- [5] Tansey, E. M. 'Keeping the Culture Alive: The Laboratory Technician in Mid-twentieth-century British Medical Research'[J]. *Notes and Records of the Royal Society*, 2008, 62(1): 77-95.
- [6] Hannah, G. 'Technical Assistance in the World of London Science, 1850-1900'[J]. *Notes and Records of the Royal Society*, 2008, 62(1): 51-75.
- [7] 王聪、李真真. 实验室生活: 技术人员在知识生产中的角色——基于德国某研究所的案例研究[J]. *科学与社会*, 2014, 4(1): 49-64.
- [8] Barley, S. R., Bechky, B. A. 'In the Backrooms of Science: The Work of Technicians in Science Labs'[J]. *Work and Occupations*, 1994, 21(1): 85-126.
- [9] Barley, S. R. 'Technicians in the Workplace: Ethnographic Evidence for Bringing Work into Organizational Studies'[J]. *Administrative Science Quarterly*, 1996, 41(3): 404-441.
- [10] 田园、王大洲. 科研机构技术支撑人员: 概念、角色与激励[J]. *自然辩证法研究*, 2013, 29(10): 56-61.
- [11] The Royal Society. 'The Association for Science Education. Supporting Success: Science Technicians in Schools and Colleges 2001'[EB/OL]. http://eric.ed.gov/ERICWebPortal/search/detailmini.jsp?_nfpb=true&_ERICExtSearch_SearchValue_0=EJ648058&ERICExtSearch_SearchType_0=no&accno=EJ648058. 2022-03-01.
- [12] Smith, D, N., Adams, J., Mount, D., et al. 'Highly Skill Technicians in Higher Education'[EB/OL]. https://www.sheffield.ac.uk/polopoly_fs/1.568318!/file/HEFCE_technicians_in_he_2004.pdf. 2022-03-01.
- [13] Hong, W. 'Domination of a Scientific Field: Capital Struggle in a Chinese Lsotope Lab'[J]. *Social Studies of Science*, 2008, 38(4): 543-570.
- [14] 钱学森. 论技术科学[J]. *科学通报*, 1957, (3): 97-104.
- [15] Hansson, S. O. 'What is Technological Science?'[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 2007, 38(3): 523-527.
- [16] 陈悦、宋超、刘则渊. 技术科学究竟是什么?[J]. *科学学研究*, 2020, 38(1): 3-9.
- [17] Collins, H. M., Evans, R. *Rethinking Expertise*[M]. Chicago: Univesity of Chicago Press, 2007, 14.
- [18] Pestre, D. 'The Difficult Decision, Taken in the 1960s, to Construct a 3-400 GeV Proton Synchrotron in Europe'[J]. *History of CERN*, 1996, 3(96): 65-96.
- [19] 李秀波、王大洲. 兰州重离子加速器装置建设的历史考察[J]. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 2019, 11(3): 297-308.
- [20] 王大洲. 中国大科学工程史[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2022.
- [21] Elzinga, A. 'Features of the Current Science Policy Regime: Viewed in Historical Perspective'[J]. *Science & Public Policy*, 2012, 39(4): 416-428.
- [22] Lauto, G., Valentin, F. 'How Large-scale Research Facilities Connect to Global Research'[J]. *Review of Policy Research*, 2013, 30(4): 381-408.
- [23] Isabelle, D. A., Heslop, L. A. 'Managing for Success in International Scientific Collaborations: Views from Canadian Government Senior Science Managers'[J]. *Science & Public Policy*, 2011, (5): 349-365.
- [24] 陈光. 大科学装置的经济与社会影响[J]. *自然辩证法研究*, 2014, 30(4): 118-122.
- [25] Langford, C. H., Langford, M. W. 'The Evolution of Rules for Access to Megascience Research Environments Viewed from Canadian Experience'[J]. *Research Policy*, 2000, 29(2): 169-179.
- [26] Merz, M., Biniok, P. 'How Technological Platforms Reconfigure Science-industry Relations: The Case of Micro-and Nanotechnology'[J]. *Minerva*, 2010, 48(2): 105-124.
- [27] Westfall, C. 'Institutional Persistence and the Material Transformation of the US National Labs: The Curious Story of the Advent of the Advanced Photon Source'[J]. *Science & Public Policy*, 2012, 39(4): 2131-2145.
- [28] 高能物理研究所大亚湾反应堆中微子实验工程办公室. 大亚湾反应堆中微子实验项目工程简介[EB/OL]. <http://dayawane.ihep.ac.cn/chinese/gcgg/gcjj/>. 2022-03-01.
- [29] 央视网. 大亚湾实验发现新中微子振荡 将助力反物质探索[EB/OL]. <http://news.cntv.cn/20120311/113877.shtml>. 2022-03-01.
- [30] 中国日报中文网. 大亚湾中微子实验成果[EB/OL],

- http://www.chinadaily.com.cn/hqjs/yinzhi/2014-09/16/content_18606943.htm. 2022-03-01.
- [31] 籍兆源、王聪、王大洲. 大亚湾反应堆中微子实验的历史考察[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2021, 13(3): 287-297.
- [32] 中国科学院. 大亚湾中微子实验成果入选《科学》年度十大突破[EB/OL], http://www.cas.cn/xw/zyxw/yw/201212/t20121224_3727383.shtml. 2022-03-01.
- [33] 闫蓓、安瑞、张冬梅. 努力工作, 用实力说话:《科学通报》对话王贻芳研究员[J]. 科学通报, 2016, 61(6): 553-555.
- [34] 科技成果管理与研究编辑部. 构建捕获中微子的陷阱——大亚湾反应堆中微子实验掺钷液体闪烁体的研制[J]. 科技成果管理与研究, 2016, (118): 87-88.
- [35] 'Liquid Scintillators'[EB/OL]. <https://www.bnl.gov/instrumentation/sensors/liquid-scintillators.php>. 2022-03-01.
- [36] 许谨诚、温同庆、孟江辰. 闪烁液体载钷[J]. 原子能科学技术, 1978, (1): 16-20.
- [37] 曾汉霞. 对加强高校实验技术人员队伍建设的思考[J]. 科技创新导报, 2009, (11): 131.
- [38] 弋双文. 构建一流科研平台 建设一流实验技术队伍[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(10): 243-247.
- [39] 施江涛、韩小涛、乔黎黎等. 高校重大科技基础设施实验技术队伍建设问题及对策[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(4): 9-13.
- [40] 郭朝晖. 当工程师遇到科学家[J]. 今日制造与升级, 2020, (9): 70-71.
- [41] 蒋茁、张利格. 高校实验技术队伍建设现状与策略研究[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(8): 234-237.
- [42] 李怀、邵慰. 高校科研人员激励制度的层级理论分析[J]. 中国科技论坛, 2009, (7): 113-118.
- [43] 迈克尔·吉本斯等. 知识生产的新模式[M]. 陈洪捷等译, 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [44] 潇湘晨报. 「两会连线」王贻芳: 下放经费管理权限让基础研究获得稳定支持[EB/OL], <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1693750541762255761&wfr=spider&for=pc>. 2021-09-22.

[责任编辑 李斌]