

中国参与铁基高温超导研究国际竞争始末

History of China's Participation in the International Competition in Iron-based High-temperature Superconductor Research

董文凯 /DONG Wenkai¹ 熊卫民 /XIONG Weimin²

(1. 江苏科技大学科学技术史研究所, 江苏镇江, 212003; 2. 北京科技大学科技史与文化遗产研究院, 北京, 100083)
(1. Institute for History of Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu, 212003;
2. Institute for Cultural Heritage and History of Science & Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083)

摘要: 在2008年的铁基高温超导研究国际竞争中, 中国科学家率先发现40K以上铁基高温超导体, 并在其物性研究方面取得一系列重要成果。通过对多位亲历者的口述访谈, 系统梳理了铁基超导体在中国的早期研究历程。2000年前后, 在国家一系列人才计划的影响下, 一批在国外一流科研机构经历多年科研训练的超导学科人才陆续回国, 他们不仅将国际超导领域的前沿研究课题、科研方法和先进技术等带回国内, 同时还组织举办了自由高效的“北京高温超导论坛”。该论坛的持续举办对中国科学家取得此次重大突破起到了直接推动作用。

关键词: 铁基高温超导 国际竞争 北京高温超导论坛 赵忠贤

Abstract: In the international competition in iron-based high-temperature superconductor research in 2008, Chinese scientists were the first to discover materials with critical temperatures above 40K, and achieved a series of important research results in terms of their properties. Through in-depth interviews with a number of key participants, the early research history of iron-based superconductors in China was systematically traced. In the late 1990s and early 2000s, under the influence of a series of talent programs, a cohort of superconductivity experts who had undergone many years of scientific training at top international research institutions returned to China. They not only brought back the frontier research topics, scientific methods, and advanced technologies from abroad, but also organized the Beijing High-Temperature Superconductivity Forum, which provided an open and efficient platform for academic exchange. The sustained operation of this forum played an important role in helping Chinese scientists achieve this major breakthrough.

Key Words: Iron-based High-temperature superconductor; International competition; Beijing High-temperature superconductivity forum; Zhao Zhongxian

中图分类号: TM26; N09 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2026.03.009 CSTR: 32281.14.jdn.2026.03.009

超导材料因具有零电阻和完全抗磁性成为20世纪最重要的科学发现之一。1911年, 荷兰莱顿大学的昂内斯(H. K. Onnes)首次在液氦环境下的金属汞中发现超导态现象, 之后, 寻

找具有高临界转变温度(以下简称“ T_c ”)的超导体便成了超导物理学家的主要研究方向之一。1986年, 分别来自德国和瑞士的物理学家柏诺兹(J. G. Bednorz)和缪勒(K. A. Müller)

基金项目: 江苏高校哲学社会科学研究项目“中国参与国际高温超导竞争的历史经验研究(1986-1994)”(项目编号: 2024SJYB1617)。

收稿日期: 2024年11月7日; **返修日期:** 2025年11月15日

作者简介: 董文凯(1994-)男, 河南鹿邑人, 江苏科技大学马克思主义学院讲师, 研究方向为中国现代科学技术史。

Email: dongwenkai5017@163.com

熊卫民(1974-)男, 湖南南县人, 北京科技大学科技史与文化遗产研究院教授, 研究方向为中国现代科学技术史。Email: xiongweimin@ustb.edu.cn

发现 T_c 为30K左右的铜氧化物高温超导体,在国际上掀起了一场高温超导研究的空前热潮。此后,人们在寻找新高温超导材料的道路上继续探索,并不断取得突破,如1991年发现的掺杂碱金属的 C_{60} , T_c 最高达33K;2001年发现的 MgB_2 , T_c 最高为39K。不过,这些新超导材料的 T_c 均未能再突破40K的麦克米兰极限^①。

2008年1月,日本东京工业大学的细野秀雄(H. Hosono)课题组发现 T_c 达26K的 $LaO(F)FeAs$ (镧氧铁砷)超导材料,在中国科学家的推动下,国际上很快便掀起新一轮高温超导研究热潮。随后,以陈仙辉、王楠林等为代表的中国科学家率先发现40K以上铁基高温超导材料,并对其物性展开系统研究,相关成果获得2013年度国家自然科学奖一等奖,填补了国家自然科学奖一等奖连续或缺3年的空白。^[1]截至2013年2月,国际铁基超导研究领域被引用数排名前20的论文中,有9篇来自中国,^[2]标志着我国的超导研究已迈入国际第一梯队。

国内外关于这场铁基高温超导研究热潮的研究已有不少。^{[3]-[9]}顾超从科学政治学角度研究和分析了1987-2008年间中国高温超导研究的发展历程,认为,国家对该领域的长期大量经费投入是中国科学家在铁基高温超导研究竞争中取得一系列重要突破的主要原因;罗会仟和马廷灿等人通过文献分析法系统梳理了2008年铁基超导材料的国内外研究进展,前者还对细野秀雄小组发现铁基超导体的历史背景做了一定介绍;这场竞争的主要参与者陈仙辉、王楠林、闻海虎等人撰写了铁基超导体的专题文章,并在文章中简要回顾了各自小组参与这场竞争的早期工作。

从已有研究看,系统梳理中国科学家参与这场国际竞争早期历程的科学史研究尚未出现,对中国科学家是如何在这场国际竞争中取得一系列重要成果的原因也缺乏全面深入的分析。基于此,本研究通过口述历史法,对中国方面的主要参与者和亲历者王楠林、陈根富、

翁征宇等人进行访谈,获取了重要的一手材料,将有助于推动上述问题的解决。

一、铁基超导体的发现及其背景

2000年,细野秀雄小组在研究透明氧化物半导体材料^②时合成了具有层状结构的 $LnOCuCh$ (Ln 指镧系元素, Ch 指氧族元素)体系半导体材料,并发现其具有较好的光电性能。在此基础上,从2000年到2006年,他们通过元素掺杂、替换又先后合成该晶相的一系列材料,如 $Mg-LaCuOSe$ (掺镁的镧铜氧硒)、 $La_2CdO_2Se_2$ (镧镉氧硒)等,主要研究它们的透明度和导电性。^[4]2006年和2007年,他们分别在 $LaOFeP$ (镧氧铁磷)和 $LaONiP$ (镧氧镍磷)体系中找到了金属导电性,后经过低温下的电阻测量,发现这类材料还具有超导电性,但这两个体系材料的 T_c 均比较低,在3-4K之间。^{[10], [11]}紧接着,该课题组继续探索这一体系材料的超导电性。根据以往的经验,他们用 As 替换 $LaOFeP$ 中的 P ,用 F 替代其中部分 O (这将有利于增加材料的电子态密度,进而可能提高其 T_c),最终获得了 T_c 高达26K的 $LaO(F)FeAs$ 超导材料。^[12]相关文章于2008年1月9日投到化学类期刊*Journal of the American Chemical Society*上。

2月18日,日本科学振兴机构和东京工业大学联合发布新闻公报,称东京工业大学细野秀雄的研究小组发现了一类“新型高温超导材料”,即 $LaOFeAs$ 化合物,并指出,它是一种由绝缘的氧化镧层和导电的砷铁层交错层叠而成的结晶化合物,“纯粹的这种物质没有超导性能,需要把一部分氧离子置换成氟离子”。紧接着,2月20日,中国的《光明日报》以“日本科学家发现一种高温超导新物质”为题报道了这一事件。^[13]2月23日, T_c 达26K的铁基超导材料的文章在网络上出版。2月26日,细野秀雄小组又通过高压手段将该体系材料的 T_c 进

①理论物理学家根据麦克米兰(W. L. Mcmillan)公式和BCS理论计算得出的常规超导体 T_c 上限,约40K。

②主要应用在各类显示器上的一类材料。透明材料通常为绝缘体,比如常见的玻璃、金刚石、塑料、氧化铝等。细野秀雄小组发现,可以通过移除层状氧化物材料中的部分氧原子,获得透明度较高的半导体材料。

一步提高到43K（4GPa的高压环境下测量），文章于4月23日在*Nature*上发表。^[14]

二、铁基超导体在中国的研究开端

新的铁基超导材料 T_c 虽然高达26K，但因相关论文发表在化学期刊上，且20K以上的超导体在此之前已发现数个，所以第一时间并未引起太多超导物理学家的关注。中国科学院物理研究所（以下简称“物理所”）的陈根富是国际上最早关注到这一信息的人之一。^[7]

陈根富于2004年在日本名古屋工业大学获得博士学位，期间主要从事重费米子超导体方面的研究。毕业后，他先后到日本名古屋大学和德国马普固体化学物理研究所工作，也均从事这方面的研究。在马普固体化学物理研究所工作时，陈根富主要与施特格利希^①（F. Steglich）手下一位叫盖贝尔（C. Geibel）的科学家合作制备CeOF₂P（铈氧铁磷）系列超导材料。不过，施特格利希课题组主要关注的是这些材料的重费米子物性，而非超导电性。当时，陈根富曾产生将这些材料中的磷替换为砷的想法，“我就觉得砷这个东西可能比磷更有意思，是一个直观的感觉”^②。但砷经过氧化后很容易变成剧毒的As₂O₃（也就是人们俗称的“砒霜”）；加上他当时外国人的身份，想要拿到含砷的原料并不容易。因此，他的这一想法当时并未能如愿实施。

2007年10月，通过盖贝尔的介绍，陈根富以“小百人”^③的身份进入物理所王楠林的课题组工作（王楠林在德国做“洪堡学者”时也在施特格利希课题组工作，与盖贝尔相识），并向物理所人事处提交了自己的研究计划表。

该表的前两项内容即是关于含砷铁基超导材料的研究，其中就包括后来细野秀雄发表的LaO(F)FeAs材料（但未掺氟）：“（1）层状氧化物超导的单晶生长及物理性能研究：Li_xNbO₂，LaFePO，LaNiPO，LaFeAsO等；（2）重费米子体-铈基化合物的单晶生长及物理性能研究：CeNiPO，CeCoAsO，CeFeAsO，CeAuBi₂系等……”^④

当陈根富向王楠林阐述自己的上述研究想法后，后者认为：“LaOFeP或者LaOFeAs可以去做做它，但不是去探测什么新的超导体（因为已经知道LaOFeAs是超导体），而是要研究它的物理性质。”有了王楠林的支持，陈根富准备立刻开展这方面的工作。不过，当时王楠林课题组缺少合成样品的一些必要设备，如处理样品所需的手套箱，“所以回来之后我需要先买手套箱、炉子这些东西”。等原料、设备都到货后，他于2007年12月初开始生长LaOFeAs单晶。^[7]遗憾的是，陈根富在这上面花了两个多月，依旧毫无进展，“长了一些晶体出来，但都是砷化镧或者其他半金属之类的物质，和超导没有关系。但这些工作的积累为后来铁基超导体的快速进展打下了基础。”^⑤

2008年的2月28日，陈根富在学术网站上看到细野秀雄课题组发表的26K铁基超导研究论文后，非常兴奋，立刻给正在合肥出差的王楠林打电话：“日本人做的LaOFeAs超导温度26K了！”王楠林听完后也很惊讶，第二天就赶回了北京。回到物理所后，王楠林很快便召集自己的组员一起开会商讨这件事，同时还邀请做超导理论的于渌^⑥和向涛^⑦两人一起参会：“我们要开会讨论一下镧氧铁砷超导体，日本人已经做到了26K，你们一块来参加听听吧。”^⑧

①1979年，发现世界上第一个重费米子超导体CeCu₂Si₂。

②作者对物理所陈根富研究员的访谈，2021年3月23日（录音收藏于中国科学院大学院史研究室）。

③物理所的一项人才计划。

④陈根富入职研究计划表（内部资料），2007。

⑤作者对北京大学王楠林教授的访谈，2021年3月19日（录音收藏于中国科学院大学院史研究室）。

⑥于渌（1937-），江苏镇江人，中国科学院理论物理所研究员，主要从事高温超导、强关联电子系统理论研究，1999年当选为中国科学院院士。

⑦向涛（1963-），湖北宜昌人，中国科学院物理所研究员，主要从事高温超导机理研究，2013年当选为中国科学院院士。

⑧作者对北京大学王楠林教授的访谈，2021年3月19日（录音收藏于中国科学院大学院史研究室）。

在组会上,王楠林和陈根富将他们手头掌握的前人关于LaOFeAs体系材料的研究做了系统介绍。之后,王楠林让全组人员放下其他工作,集中精力做LaO(F)FeAs超导体。鉴于陈根富之前两个多月单晶合成失败的教训,王楠林建议他直接转向合成LaO(F)FeAs的多晶样品。由于原料、设备等条件均已具备,他们很快便重复出了细野秀雄小组的工作,成功合成LaO(F)FeAs的多晶样品,并测得20K以上的 T_c 。“大概几天的时间,这个超导体就做出来的。然后就是表征一下它的物理性能。细野秀雄是做化学的,他不做这些东西。”3月2日,他们将有关文章投给*Physical Review Letters*,^[15]并在第二天将文章放在了arXiv.org网站上(arXiv:0803.0128),以确立这项工作的优先权,这也是铁基超导材料在物理领域的第一篇研究论文^①。^[7]

3月1日至5日,北京大学的韩汝珊召集国内一批从事铜氧化物高温超导机理研究的科学家,在物理所举办“高温超导机制研究态势评估研讨会”。王楠林将他们组的第一篇铁基超导研究文章投出后,就在这次会议的最后几天与别人交流了这一事情,当时国内也有其他人已注意到细野秀雄的文章,并开始着手研究,但因为不具备原料、设备等条件,进度比王楠林课题组稍慢。“像物理所的闻海虎,他们也知道铁基超导,也在做,但我们做的很快,因为手边什么东西都在。”由于在此之前,20多K的超导体已不算稀奇,因此也不是所有人都对此事上心。“像当时来开会的浙江大学的许祝安说,你们都做出来了,我们再做也没什么意思。”^②值得一提的是,这次会议的受邀者之中还包括中国科学技术大学(以下简称“中科大”)的陈仙辉。陈仙辉和王楠林曾是中科大物理学院的同学,二人研究方向相近,一直保持着紧密联系。陈仙辉当时对铁基超导比较感兴趣,会后,他专门参观了王楠林的实验室,

并从陈根富那儿带走了一些原料砷^③。回到合肥后的陈仙辉,当天夜里11点便召集学生开会讨论并开展相关工作。^[16]

王楠林的第一篇铁基超导文章放到arXiv.org网站上后,很快便引起一些国际同行的关注。美国橡树岭国家实验室的辛格(D. J. Singh)等人^[17]和美国罗格斯大学的豪勒(K. Haule)等人(arXiv:0803.1279)分别在3月4日和9日计算了LaO(F)FeAs超导体的电子结构,初步揭示该材料属于一种不同于铜氧化物超导体的新型高温超导体。^[17]3月5日,物理所的闻海虎小组也制备出LaO(F)FeAs超导体,成为国际上最早验证细野秀雄研究工作的小组之一(arXiv:0803.0623)。紧接着,闻海虎小组又在新的铁基超导材料探索上率先取得突破。3月14日,他们用铟替代部分镧制备出第一个空穴型掺杂的铁基超导体——La(Sr)OFeAs, T_c 为25.6K。^[18]而此前,细野秀雄小组认为,LaOFeAs材料体系实现超导的关键因素是电子型掺杂,空穴型掺杂无法实现^④。不久,3月17日,美国橡树岭国家实验室的曼德斯(D. Mandrus)小组^[19]对LaO_{0.89}(F_{0.11})FeAs超导体的研究取得进一步成果,测定了其晶体结构、霍尔系数、热导率等物性数据(arXiv:0803.2528)。

王楠林小组在合成LaO(F)FeAs的同时,也制备了不掺杂的LaOFeAs母体样品,发现该样品未出现超导态,同时样品在150K左右发生电阻反常现象,这个结果与细野秀雄文章中提到的一致。由于细野秀雄不是专门研究超导材料的,他在文中并未给出解释。为了研究这种现象,王楠林小组又合成了一批掺杂不同氟含量的LaO(F)FeAs材料,与母体进行对比研究。他们通过自己擅长的光学仪器对材料进行结构表征,发现从制备的样品中可以看到“能隙打开”,由此初步判断铁基超导体的这种反常现象由密度波有序态造成,但无法确定是电荷密

①这篇文章的投稿并非一帆风顺,王楠林提到,“审稿人指出目前世界上高场实验室很多,要求我们补充数据,直接测量出超导体的上临界场。我们只好与工作在高场实验室的研究人员联系开展合作研究,导致这一工作发表用时较长。”后来,他与美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的袁辉球博士和辛格尔顿(J. Singleton)合作,做了材料的上临界磁场测量。

②作者对北京大学王楠林教授的访谈,2021年3月19日(录音收藏于中国科学院大学院史研究室)。

③在作者对王楠林和陈根富的访谈中,两人都谈到了这一点。

④用氟替代部分氧得到的是电子型掺杂超导体,用铟替代部分镧得到的是空穴型掺杂超导体。

度波还是自旋密度波^①。

3月20日左右,王楠林在物理所的活动室和王玉鹏、方忠等人聊天时,随口聊到这件事情。从事超导理论研究的方忠谈到,他们课题组最近也在做这方面的工作,并初步认为它应该属于自旋密度波。在王玉鹏所长的建议下,擅长实验的王楠林组与擅长理论的方忠组合作写了一篇关于铁基超导机理的文章,“前面是我们的实验结果,后面他做第一性原理计算,这是一个比较重要的文章。”该文章首次指出LaOFeAs母体存在超导态和自旋密度波不稳定性的相互竞争,并从费米面叠套预言了自旋密度波状态下的条纹反铁磁序磁结构,从而为认识铁基超导机理打下了重要基础。3月24日,他们将该文章放在arXiv.org网站上(arXiv:0803.3426),同时投稿给*Nature Physics*。两个星期后,*Nature Physics*编辑转来审稿人意见,认为“关于自旋密度波和相应磁结构的指认是猜测性的,只有有了中子散射实验的直接证据后才会重新考虑该稿件。”^[7]收到这一意见时,王楠林小组已与美国田纳西大学的戴鹏程小组合作,由王楠林小组提供LaOFeAs样品,戴鹏程小组对该样品开展中子散射的实验测量。中子散射实验很快便确定了LaOFeAs具有磁有序结构^②,相关论文于4月1日投给*Nature*,并在1个月后被接收。^[20]当王楠林向*Nature Physics*的编辑出示中子散射实验结果时,该编辑认为这两篇文章大致在讨论同一件事情,已经没必要再接收了。他们只好于5月8日将这篇文章转投给*Europhysics Letters*(5月30日,该文章被顺利接收)。王楠林、方忠、戴鹏程等人的研究表明,铁基超导体不属于传统超导体,而是名符其实的高温超导体!^[4]

在王楠林与方忠等人合作的同时,陈根富对新铁基超导材料的探索也在如火如荼地进行着。他想到原来在德国时做过的CeOFeAs,就用Ce替代La,As替代P,同时用F替代部分O,

合成了CeO(F)FeAs超导体。3月25日,陈根富测试了该样品的电阻率,“一看样品已经达到40K超导了,这就是比较大的事情了!”恰好同一天下午,中科大的陈仙辉给王楠林打电话,但当时未能联系到后者。之后,陈仙辉又找到王楠林课题组的雒建林,告诉他:他们发现了40K以上的铁基超导体,但因测试手段不足,希望派学生到王楠林组补充一些样品的物性测试。雒建林认为此事较为重大,建议找到王楠林本人商定。当天夜里,陈仙辉和王楠林接通电话,两人互相告知对方自己组里发现了 T_c 超过40K的铁基高温超导体(未提及材料组分)。陈仙辉得知这一消息后,认为再派学生过去不妥,因此就放弃了这个想法^③。

3月25日,陈仙辉小组向*Nature*投出 T_c 为43K的SmO(F)FeAs(钐氧铁砷)铁基超导研究论文,并同时在arXiv.org网站上公布(arXiv:0803.3603v2)。^[21]这是国际上第一篇 T_c 越过麦克米兰极限的铁基超导体论文,被*Nature*审稿人评价为“开辟了铁基高温超导体的新领域”。^[6]紧接着,第二天,王楠林小组在arXiv.org网站上报道了 T_c 为41K的CeO(F)FeAs超导体研究信息,同时通过多种测量手段发现,“该体系也同样存在超导电性与自旋密度波序的竞争”,由此他们判断,与反铁磁自旋密度波不稳定性邻近是该类材料寻找高温超导体的要素之一(arXiv:0803.3790)。该文章后被*Physical Review Letters*接收。^[22]

在此之后,铁基超导研究领域快速发展。物理所赵忠贤团队具有丰富的材料合成经验。早在1986–1987年的铜基高温超导研究国际竞争中,他们就做出过一系列重要成果。^[23]1993年,他们还对RCuSeO(R指稀土元素)体系展开过系统研究,“但没有研究Fe替代Cu的问题”;^[8]此外,高压合成法也使他们样品合成速度较快,“用高压手段两个小时就把样品做了”^④,而一般手段则需要3–5天的时间^④。3月

①自旋密度波(SDW)与电荷密度波(CDW)是固态物质中两种类似的低能有序态。

②磁有序是指原子磁矩空间取向的周期性显示,包括铁磁、反铁磁等几种类型。

③作者对北京大学王楠林教授的访谈,2021年3月19日(录音收藏于中国科学院大学院史研究室)。

④作者对物理所罗会仟研究员的访谈,2024年11月4日(录音收藏于中国科学院大学院史研究室)。

28日,赵忠贤小组利用高压法率先在国际上发现 T_c 超过50K的 $\text{PrO}(\text{F})\text{FeAs}$ (镨氧铁砷)超导材料。4月16日,他们又通过高压法合成了一系列无氟缺氧型铁基超导体 $\text{ReFeAsO}_{1-\delta}$ (Re为稀土元素),其中, $\text{SmFeAsO}_{0.85}$ 的 T_c 最高达到55K。^[5]紧接着,第二天,日本产业技术综合研究所的圣岩(K. Hijiri)等人也利用高压法制备出无氟缺氧型铁基超导体 NdFeAsO_{1-y} ,其 T_c 最高为54K,未能打破赵忠贤团队创造的铁基超导 T_c 记录^①。^{[24]-[26]}

值得一提的是,在铁基超导体的应用研究上,我国科学家的反应也十分迅速。6月18日,中国科学院电工所应用超导重点实验室的马衍伟团队通过粉末装管法,以铁作为包覆层、钛作为缓冲层,在国际上率先研制出 T_c 为25K的 $\text{LaO}(\text{F})\text{FeAs}$ 线材,这是国际上第一个将铁基超导材料加工成超导线材的工作,对于其强电应用探索具有重要意义。^[27]在此基础上,2014年,该团队与日本东北大学的大黑英寿(H. Oguro)等人合作制备了电流传输能力超过 $10^5\text{A}/\text{cm}^2$ (4.2K, 10T)的 $\text{Sr}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ 铁基超导带材,标志着铁基超导体达到了实用化门槛。^[28]两年后,他们再次与大黑英寿等人合作在国际上率先制备出百米量级的铁基超导带材,“奠定了铁基超导材料规模化应用的基础”。^[29]基于上述一系列创新工作,马衍伟于2019年被欧洲应用超导学会授予“国际应用超导杰出贡献奖”。

鉴于中国科学家在铁基超导研究领域的快速响应和重要贡献,*Science*在2008年4月25日以“新超导体将中国超导物理学家推到最前沿”为题发表了评论文章,文章中提到:“中国如洪流般涌现的结果,标志着中国在凝聚态物理领域已经成为一个强国。”^[30]2009年9月,香港求是科技基金会授予在铁基超导国际竞争中做出突出贡献的8位(分4组)中国科学家“求是杰出科技成就集体奖”(陈仙辉和吴刚、王楠林和陈根富、赵忠贤和任治安、闻海虎和祝

熙宇)。2014年1月,“40K以上铁基高温超导体的发现及若干基本物理性质研究”荣获2013年度国家自然科学奖一等奖,获奖人分别为:赵忠贤、陈仙辉、王楠林、闻海虎、方忠。^[31]其中,赵忠贤和陈仙辉还在2015年举办的第11届国际超导材料与机理大会上,被授予超导材料探索领域的最重要奖项——“马蒂亚斯奖(Bernd Matthias Prize)”,这是中国大陆科学家首次获得该奖项。此外,赵忠贤还因为对铜基和铁基高温超导研究的突出贡献而获得2016年度国家最高科学技术奖和2024年度“人民科学家”国家荣誉称号。

三、铁基超导体在中国取得重大突破的原因

为何中国科学家能在铁基超导领域频频做出重要成果,不断引领国际发展潮流?笔者认为,这在很大程度上是因为他们融入了国际科学界,和国际同行遵守同样的游戏规则,有密切的交流,能够和后者一道发展、共同进步。

相关科学家多数有在海外著名实验室留学的经历,然后被人才计划引回国内。20世纪90年代中期以来,在国家科教兴国战略的指导下,中央和地方相继颁布和实施了一系列人才引进和培养措施,如中国科学院的“百人计划”、国家自然科学基金委的“国家杰出青年科学基金”^②、教育部和李嘉诚基金会的长江学者奖励计划,等等。与这些人才计划配套实施的,还有同期从美国引进的扩大了科学家人事权、财权的PI制。在2008年之前,这些制度和政策的实施为中国吸引和培养了一批重要的超导学科带头人。以王楠林为例,他在国外一直从事强关联电子体系的红外光谱研究,回国后,较好地填补了国内这个方向的研究空白。“百人计划”资助了他200万元人民币,让他能够购置一批国外的先进仪器,满足基本的科研

①截至2022年,有多篇文章指出这是“1111”体系铁基超导材料的最高 T_c 纪录。但在2008年也有其他文章声称发现了更高 T_c 的该体系铁基超导材料。

②陈仙辉和闻海虎为1998年杰出青年基金获得者,王楠林和方忠分别在2000年和2004年获得这一基金资助。

需求。他提到,“国内在2000年之后,发展很快。随着人才政策的逐步完善,陆续回国一批人,做的很出色。”^①向涛、周兴江^②、封东来^③、李建新、陈根富、丁洪^④等被引进的人才,也纷纷利用自己在国外学到的各类实验手段或前沿理论,在国内的实验室攻克了高温超导研究中的“硬核”^⑤物理问题。“所以2008年铁基超导体这个事情,原则上是必然发生的”,王楠林对此评价道。物理所所长王玉鹏在2008年接受《光明日报》记者采访时也曾提到:“高水平人才的引进和青年人才的培养,是物理所能够发展到目前局面的最关键因素之一。”^[32]

具有国际视野的超导学科人才回国后,将国际上超导领域最前沿的研究课题、科研方法和先进技术等带回国内,迅速提升了国内的超导研究水平。不仅如此,他们还主动承担起国内外超导学术交流的“桥梁”,利用自己在国外学术界的人脉关系,组织高效自由的学术交流活动,帮助国内年轻超导学者快速成长。其中,以翁征宇、闻海虎、向涛等人组织的北京高温超导论坛最具有代表性^⑥。

2001年,翁征宇参加了由赵忠贤等人在云南丽江组织的一次国际超导会议。在这次会议上,他遇到丁洪、戴鹏程、潘庶亨三位在国际上已经有一定影响力的中国超导物理学家。翁征宇和他们聊起当时国内的超导物理学发展状况,他们感叹,国内与国外仍存在着不小的差距。翁征宇当即表态“如果你们每年夏天都愿意回来的话,我们可以在国内组织一个讨论会。”^⑦丁洪等人欣然表示同意。会议结束后,翁征宇找到当时在国内超导界具有一定组织能力的闻海虎和向涛,向他们说出了自己的想法,并得到他们的支持。之后,他们三人作为最早的组织者和出资人在当年试办了第一届北京高

温超导论坛。

第一届论坛的参加者有20多人,这也是组织者特意安排的,“开始人比较少,更多的是希望真正在第一线工作的学者直接碰头。”在报告形式上,它不同于常规会议的学术报告,而是由组织者在开会之前,一起商讨几个国际上最近重点关注的议题(在确定议题的过程中也会咨询其他参会者的意见),“更多的是去讨论一些实质性的、最热门、最重要的问题,这样,国内外实验方面的进展会对国内超导研究有很大的促进。”^⑧每个议题选定一位主席,开场时,由各个议题的主席先作20分钟引导性发言,介绍该方向最新的研究进展。之后,参会者围绕该议题进行自由发言和讨论。在上台发言时间上,每个人一般为15分钟,发言人用一半时间针对议题发表见解,另一半时间留作参会者讨论。在参会人员选择上,以国内外的中青年超导学者为主,同时也邀请了少数已具有一定国际影响力的超导学者参会(如斯坦福大学的沈志勋和张守成、加州大学伯克利分校的李东海、麻省理工学院的文小刚等人在后几届论坛中都被邀请)。参会人员多是超导电性机理的研究者,有的从事实验研究,有的从事理论研究,通过这种实验与理论的碰撞,较好地开阔了我国超导物理学家的研究视野。

第一届论坛的参会者纷纷表示收获很大,希望他们能继续办下去。从2002年开始,他们正式对外发布公告,“本论坛是顺应国际高温超导机理研究的快速发展而举行的。其宗旨是通过前沿理论和实验的充分讨论,产生出新的物理思想,促进高温超导机理研究的发展。”并将2002年的这一届称为“首届北京高温超导机理前沿论坛”。^[33]这个论坛一直延续至今,期间仅2003年和2020年因疫情原因停办两次。值

①作者对北京大学王楠林教授的访谈,2021年3月19日(录音收藏于中国科学院大学史研究室)。

②周兴江(1966-),江苏淮阴人,中国科学院物理所研究员,超导国家重点实验室主任,主要从事高温超导材料的机理研究。

③封东来(1972-),江苏盐城人,中国科学技术大学教授,主要从事复杂量子材料及其微结构的实验研究。2021年当选为中国科学院院士。

④丁洪(1968-),福建古田人,上海交通大学教授,主要从事凝聚态物理的实验研究。2023年当选为中国科学院院士。

⑤除了合成超导材料外,这批人才回国后,还利用各种新兴的谱学技术解决超导物理学的本质问题,如强关联电子体系。

⑥在2008年铁基高温超导研究竞争中,中国方面做出重要成果的科研人员大多都是北京高温超导论坛的参与者。

⑦作者对清华大学翁征宇教授的访谈,2021年3月25日(录音收藏于中国科学院大学史研究室)。

得一提的是,随着国内超导物理学的蓬勃发展,尤其是2008年铁基高温超导体发现之后,申请参加该论坛的人数越来越多。但为了保证论坛原有的自由与高效,翁征宇等人一直严格控制着参会人数,“我们需要控制规模,因为规模大了以后,以往的形式越来越难展开,大家不容易聚焦在一个点上。”到2021年时,该论坛的人数也仅从最初的20多人增长到六七十人,即使是组织者的学生也不是随便就能参加(入会需要有翁征宇、闻海虎和向涛三人的共同邀请)^①。

北京高温超导论坛的举办使一批刚回国不久的超导学者能够较快地适应国内学术环境,为他们提供了一个自由、融洽的学术交流平台。由于规模小,参会人员彼此较为熟悉,大家能够就最前沿、最重要的科学问题展开畅所欲言的沟通和交流,极大地激发了研究者的参与热情。它在潜移默化中提高了国内超导物理学的研究水平,帮助一批年轻的超导学者快速成长,同时也对一批能力出众的年轻超导学者回国产生了积极影响^②。

对于组织了20多年北京高温超导论坛的翁征宇来说,“国内这20年超导发展非常快,队伍也起来的很快,尤其是水平,和我们第一届比的话,确实是突飞猛进,现在很多(人)已经是世界级的了。所以这个交流是非常有用的。”^①参会者王楠林的感受与其相似:“这个论坛还一直在办,最后变成一个品牌,对提高国内的超导研究是非常必要的。”^③

当然,现代科学的重大突破也离不开对相关领域持续的资金投入,超导学科也不例外。哪怕是在尚未实施“211工程”“973计划”“985工程”“知识创新工程”等工程或计划、科研经费很是短缺的1990年代前期,我国政府依旧对高温超导研究保持着兴趣(当时,铜基高温超导体的研究进展已经放缓,国际上许多科研人员不得不改变研究方向以求生存),并给予一定

的经费支持。^[32]以超导国家重点实验室为例,1991-1994年的到账经费分别为63万、244万(含建设经费100万)、139万(含建设经费15万)、150万元人民币^④。各课题组精打细算,“基本保证了课题正常运行、开放合作学术交流和实验室建设。”^[34]1994年正式启动“百人计划”、1998年正式启动“知识创新工程”试点以来,高温超导研究项目相关人才更是得到了较为充沛的经费支持。值得一提的是,在2008年的铁基超导国际竞争中,中国科学家的工作多数还得到了国家自然科学基金、“973计划”等竞争性经费的支持。

结 语

中国科学家在2008年铁基高温超导研究国际竞争中的表现,标志着中国的超导研究水平已迈入国际第一梯队。而他们之所以能够在这场国际竞争中取得一系列重要突破,是20世纪90年代以来中国持续对高温超导领域大量投入科研经费、一批具有国际一流水平的科研人才归国以及自由高效的国际学术交流活动举办共同推动的结果。

不过,我们也应看到,无论是铜基超导还是铁基超导,我国均未能成为首个发现地。从柏诺兹、缪勒再到细野秀雄,他们的经历深刻地诠释了“从0到1”的原始创新成果一方面需要跨学科、多维度的学术交流,另一方面,也需要自由、宽容的科研环境。这就需要我国继续深化科技体制改革,强化前沿交叉领域的国际科技交流与合作,以及构建保障科研人员专心科研的评价体系。

[参考文献]

- [1] 杨舒. 国家自然科学基金一等奖 翹首3年终有斩获[N]. 光明日报, 2014-1-12(04).
- [2] 喻思安. 国家自然科学基金一等奖“40K以上铁基高温超导

①作者对清华大学翁征宇教授的访谈,2021年3月25日(录音收藏于中国科学院大学院史研究室)。

②根据王楠林和翁征宇的陈述,后来成为北京高温超导论坛组织者之一的丁洪回国,与前期该论坛的举办有直接关系。

③作者对北京大学王楠林教授的访谈,2021年3月19日(录音收藏于中国科学院大学院史研究室)。

④除了国家和中国科学院下拨的实验室日常运行费外(每年固定30-35万元人民币),其他经费主要来自“攀登计划”和“863计划”。

- 体的发现及研究”[N]. 人民日报, 2014-01-13 (20).
- [3] Gu, C. 'The Co-Production of Normal Science: A Social History of HTS Research in China (1987-2008)'[J]. *Social Studies of Science*, 2023, 53(1): 81-101.
- [4] 罗会仟. 超导“小时代”: 超导的前世、今生和未来[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022, 253-260.
- [5] 马廷灿、万勇、姜山. 铁基超导材料制备研究进展[J]. 科学通报, 2009, 54 (5): 557-568.
- [6] 陈仙辉. 铁基高温超导体研究进展[J]. 物理, 2009, 38 (9): 609-616.
- [7] 王楠林. 铁基超导体初期部分研究工作介绍[J]. 科学观察, 2010, 5 (6): 55-57.
- [8] 闻海虎. 铁基超导实验研究与中国超导研究展望[J]. 科技导报, 2021, 39 (12): 90-94.
- [9] 周兴江. 高温超导的发展历程及其重要意义[J]. 科学通报, 2017, 62 (8): 745-748.
- [10] Kamihara, Y., Hiramatsu, H., et al. 'Iron-Based Layered Superconductor: LaOFeP'[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128(31): 100012-10013.
- [11] Watanabe, T., Yanagi, H., et al. 'Nickel-Based Oxyphosphide Superconductor with a Layered Crystal Structure, LaNiOP'[J]. *Inorganic Chemistry*, 2007, 46: 7719-7721.
- [12] Kamihara, Y., Watanabe, T., et al. 'Iron-Based Layered Superconductor La[O_{1-x}F_x]FeAs(x=0.05-0.12) with T_c=26K'[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(11): 3296-3297.
- [13] 日本科学家发现一种高温超导新物质[N]. 光明日报, 2008-02-20 (08).
- [14] Takahashi, H., Igawa, K., et al. 'Superconductivity at 43 K in an Iron-Based Layered Compound LaO_{1-x}F_xFeAs'[J]. *Nature*, 2008, 453(7193): 376-378.
- [15] Chen, G. F., Li, Z., et al. 'Superconducting Properties of the Fe-Based Layered Superconductor LaFeAsO_{0.9}F_{0.1}'[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101: 057007.
- [16] 刘爱华. 给超导学术界一个大大的惊叹号[N]. 科技日报, 2015-12-09 (07).
- [17] Mazin, I. I., Singh, D. J., et al. 'Unconventional Superconductivity with a Sign Reversal in the Order Parameter of LaFeAsO_(1-x)F_(x)'[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(5): 057003.
- [18] Wen, H. H., Mu, G., et al. 'Superconductivity at 25K in Hole-Doped (La_{1-x}Sr_x)OFeAs'[J]. *Europhysics Letters*, 2008, 82: 17009.
- [19] Sefat, A. S., McGuire, M. A., et al. 'Electronic Correlations in the Superconductor LaFeAsO_{0.89}F_{0.11} with Low Carrier Density'[J]. *Physical Review B*, 2008, 77: 174503.
- [20] Cruz, C., Huang, Q., et al. 'Magnetic Order Close to Superconductivity in the Iron-Based Layered LaO_(1-x)F_(x)FeAs Systems'[J]. *Nature*, 2008, 453(7197): 899-902.
- [21] Chen, X. H., Wu, T., et al. 'Superconductivity at 43 K in SmFeAsO_{1-x}F_x'[J]. *Nature*, 2008, 453(7193): 761-762.
- [22] Chen, G. F., Li, Z., et al. Superconductivity at 41K and Its Competition with Spin-Density-Wave Instability in Layered CeO_{1-x}F_xFeAs'[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(24): 247002.
- [23] 董文凯、熊卫民. 中国参与铜氧化物超导体国际竞争的进程及影响[J]. 自然科学史研究, 2023, 42 (3): 348-364.
- [24] 谷亚东. 几种铁基超导体、过渡金属化合物的掺杂调控和超导探索[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2022.
- [25] Wang, C., Li, L. J., et al. 'Thorium-Doping-Induced Superconductivity up to 56 K in Gd_{1-x}Th_xFeAsO'[J]. *Europhysics Letters*, 2008, 83(6): 67006.
- [26] Wei, Z., Li, H., et al. 'Superconductivity at 57.3 K in La-doped Iron-Based Layered Compound Sm_{0.95}La_{0.05}O_{0.85}F_{0.15}FeAs'[J]. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2008, 21(4): 213-215.
- [27] 齐芳. 我科学家研制出新型铁基超导体线材[N]. 光明日报, 2008-09-06 (03).
- [28] Zhang, X., Yao, C., et al. 'Realization of Practical Level Current Densities in Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ Tape Conductors for High-Field Applications'[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 202601.
- [29] 郭文文、姚超等. 铁基超导线材实用化研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53 (12): 148-162.
- [30] Cho, A. 'New Superconductors Propel Chinese Physicists to Forefront'[J]. *Science*, 2008, 320(5875): 432-433.
- [31] 铁基高温超导研究获自然科学一等奖[OL], 科学网, <https://news.sciencenet.cn/submore.aspx?id=1613&subid=1616>. 2014-01-10.
- [32] 齐芳. 新超导材料研究怎样走到国际最前沿[N]. 光明日报, 2008-05-14 (02).
- [33] “首届北京高温超导机理前沿论坛”在京举行[J]. 新材料产业, 2002, (8): 13.
- [34] 超导国家重点实验室评估申请报告[Z]. 中国科学院物理所, 1995-08-01, 北京: 中国科学院物理所档案室, 1995-A-04-006-3.