

超导——能源信息等领域的战略级科技

中国科学院院士、中国科大物理系教授 陈仙辉

今年以来，我国自主设计建造的“人造太阳”全超导托卡马克核聚变实验装置（EAST）取得重大成果，“祖冲之号”超导量子计算机也不断取得新的突破，标志着我国在能源、信息相关前沿研究领域占据了制高点。在这些重大科技突破的背后，都离不开超导材料与超导技术的发展。

超导是人类发现的第一种宏观量子现象，具有丰富科学内涵和广阔应用前景。超导表现出的零电阻和完全抗磁性等奇特性质，目前已在近万种材料中被发现。超导的研究历程已经跨越了一个多世纪，但人们的研究兴趣依然未减。超导研究一次次打破人们对微观物质世界的认知，推动了新物理概念的产生、新物理规律的发现和新方法的建立；超导材料也被广泛地应用于能源、信息、医疗、国防、交通等领域，在许多方面发挥着不可替代的作用。

零电阻和完全抗磁性是超导体的基本物理特征

对超导态的认识可以追溯到1911年，当荷兰物理学家卡末林·昂内斯把金属汞冷却到液氮温度4.2开尔文（约为零下269摄氏度）时，意外发现其电阻跳跃式地下降到了设备检测不到的数值。卡末林·昂内斯将这一当时物理学界无法理解的全新物态命名为“超导态”，进入超导态的物体被称为超导体。随后20多年时间里，物理学家又发现超导态的完全抗磁性：小磁场无法穿透到超导体的内部。换言之，磁场被超导体排斥，只能从超导体的表面附近“绕过去”。这些独特的电磁学性质与人们所熟知的金属特性完全不同，需要一套全新的物理理论进行描述。

对超导态的解释是20世纪前半叶物理学最重要的问题之一。许多顶尖物理学家提出过自己的见解，但都不能完全解释实验现象。上世纪50年代末，这个方向出现了重大突破——在理论和实验物理工作者的共同努力下，人们确认超导态的出现是由于固体中电子受到原子振动影响，两个电子之间产生相互吸引作用，形成特殊的“电子对”。配成对的两个电子可以当作一个基本的单元来考虑，它们的行为与单个电子截然不同，能够相干在一起发生宏观凝聚现象，形成具有零电阻和完全抗磁性的超导态。这一超导微

观理论是量子力学建立之后最重要的理论进展之一，其建立的概念也推动了宇宙学、粒子物理学、核物理学等学科的发展。

持续探索超导材料，高温超导家族不断壮大

建立超导态形成的微观理论的同时，人们也在寻找具有更高超导转变温度（即临界温度）的材料。遗憾的是，几十年时间里超导临界温度的提升并不明显，最高只能到20多开尔文，离最常用的制冷剂——液氮的沸点温度（77开尔文）还很遥远。1986年，超导材料探索终于实现巨大突破：瑞士科学家在一类铜氧化物体系中发现了超过30开尔文的超导电性。这是20世纪科学史上的标志性事件之一。很快，一系列突破液氮温度的高温铜氧化物超导体被发现，我国科学家和华人科学家在其中作出了重要贡献。目前铜氧化物高温超导体已经成为一个庞大的超导家族，一些材料也开始规模化应用。

2008年，超导材料的探索又迎来了重大进展：第二个高温超导家族——铁基超导体被发现。这些材料是含有铁元素的磁性金属，其超导态在元素替换或高压合成下演化出丰富的行为。我国科学家在发现铁基超导材料以及对其超导机理的研究中，处于国际领先的位置。高温超导的发现向理论研究提出新的挑战，其具体机制的探索仍在进行中。高温超导微观理论的构建是当代物理学界急需解决的重要科学问题，对这个问题的解答将标志着人类对物质世界认知水平的一次重大突破。

在能源、信息等领域带来深刻变革的战略级科技

超导体由于其独特的物理性质，在很多领域发挥着不可替代的作用。超导体的零电阻特性使其成为一种理想的低能耗材料，在能源领域有广泛应用前景。它可以帮助我们显著降低电力工业中的传输损耗和能源、冶金工业中的碳排放，为实现“双碳”目标作出贡献。超导线缆的实用化是实现大功率、

低损耗、高稳定性输电的重要方案之一。目前我国在这一技术领域已经有了明显进展：国内首个千米级超导电缆在上海投入使用，并取代了部分传统变电站的作用；深圳为满足平安大厦较大的供电需求，建设了一支长度为400米的超导电缆。这些是超导电缆应用方面里程碑式的成果。此外，能够保护电路免受大电流冲击的超导限流器也已经在南方电网进入应用阶段。

随着我国基础设施建设和制造业的高速发展，对有色金属及其合金的需求与日俱增。有色金属的传统加工手段是使用常规感应加热，即利用高频交流电场在金属表面的趋肤效应加热，以高热导特性实现整体熔融并进行加工。这种感应加热长期存在能耗高、效率低的问题。我国最新开发的超导电磁感应加热技术，兆瓦级的装置每年可以节省800万千瓦时电，加热效率从原来的40%—45%提高到80%—85%。

基于超导体的强载流特性，可以制造无损耗的超导磁体线圈，实现传统磁体不能提供的磁场强度和稳定性。超导磁体所提供的超强磁场将有助于实现可控核聚变——在聚变堆内部，温度高达上亿摄氏度，超过任何材料的熔点，因此热核反应工作物质只能通过强磁场约束在反应区内；巨型强磁场超导磁体线圈的应用将有力推动可控核聚变技术的实用化，为能源产业带来颠覆性变革。超导磁体的另一个重要应用场景是生物医学：多数医用核磁共振成像设备都要用到超导磁体，通过不断提升超导线圈提供的磁场，可以显著提高核磁共振成像的分辨率，实现更快速、更准确的临床医学诊断。

作为人类利用电磁相互作用的极限手段之一，超导体在电子器件领域也具有显著优势。超导电子对穿过两个超导体之间的绝缘夹层时会发生强烈的干涉效应，即约瑟夫森效应。这种隧穿对外磁场的响应极为灵敏。基于约瑟夫森效应设计的超导量子干涉器件，能够探测地球磁场几十亿分之一的微弱磁场变化，被广泛应用于材料

科学、地质勘探中的磁性测量以及临床医学中的生物磁成像。超导薄膜和约瑟夫森结组成器件单元和电路，可以形成传感器、探测器、数字电路、量子比特等多种超导电子有源器件和滤波器、电磁超材料等无源器件，在灵敏度、噪声、速度、功耗、带宽等方面具有传统半导体器件无可比拟的优势。约瑟夫森效应也被用于设计超导量子比特，成为量子计算机的基本单元；超导量子计算在过去20多年发展迅速，已经从最初的展示宏观电路量子特性的基础研究，发展成一个有可能孕育出变革性新技术的方向。

超导体在微电子技术中的应用会成为解决目前半导体集成电路功耗问题的关键。传统半导体晶体管器件随着集成度的不断提高，正面临功耗瓶颈、发热严重、能耗过高等挑战。由于未来制造业以数字化和智能化为主，需要处理的数据量随着产业升级而急剧增加，超级计算机所需的大空间、高功耗和高散热正制约着算力的进一步提升。相比于传统半导体，使用超导电子学元件的超级计算机能耗降低五个量级，速度可以提升两个量级，且工艺和设计上与半导体技术相互兼容。因此，超导计算机的开发将为应对能耗问题提供一个可行的出路。

自超导现象被发现以来，室温超导体就是人类的一个长期梦想。目前，并不存在可靠的理论证明室温超导不会存在，而超导材料探索中的多次惊喜也一步步打破对追求室温超导的限制。近年来，人们在高压下的富氢化合物中实现了转变温度接近零下20摄氏度的超导电性，看到了获得室温超导体的希望。随着人们对材料探索、设计、合成和控制能力的不断提升，超导材料的探索进程极大加速，室温超导之梦已非遥不可及。中国超导科研工作者将抓住这一领域蓬勃发展的历史机遇，再接再厉、勇攀高峰，争取更多科学突破，为我国经济社会发展贡献科技力量。

（原载于《人民日报》2023年11月3日）

中国科大创新科教融合方式,构建卓越科技创新体系 勇攀科学高峰 培育科技英才

近日，在中国科大的机器化学家实验室，机器人“小来”正有条不紊地穿梭在各个操作台前。这款全球首个集阅读文献、设计实验、自主优化、覆盖化学品开发全流程于一体的机器人被形象地称为“机器化学家”，由中国科大化学物理系教授江俊团队开发。

从2014年集结团队、提出概念，到最终项目落地，江俊团队十年磨一剑。这样的坚守，正是中国科大围绕国家战略需求，聚焦科学发展方向，立足高站位、宽视野、大格局，多措并举，奋力写好“强国建设、教育担当”的生动缩影。

锚定基础研究，服务国家战略需求

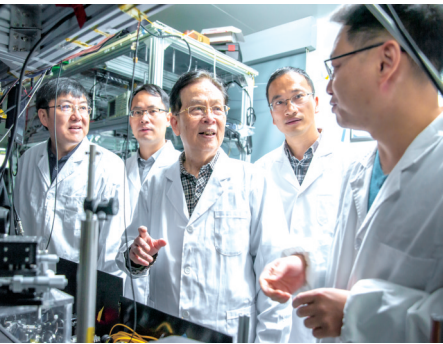
1958年，在时任中国科学院院长郭沫若和一批科学家的倡议下，中国科大应运而生。作为一所为“两弹一星”事业创办的大学，服务国家战略需求、为党和国家培养尖端科技人才是中国科大人与生俱来的价值追求。

中国科大党委书记舒歌群表示：“多年来，中国科大发挥‘所系结合’优势、创新科教融合方式，勇担国家战略科技力量重任，夯实科技自立自强根基，立足量子科技、人工智能和深空深地等领域，取得了一大批原创性科研成果。”

从“两弹一星”，到探月工程；从大尺度的空间探测，到微尺度的量子调控；从建设同步辐射加速器，到全面参与建设合肥综合性国家科学中心；从开通国际上首条千公里级量子保密通信干线“京沪干线”，到研制出世界首台光量子计算原型机……中国科大用一项项科技成就践行了校歌中“把红旗插上科学的高峰”的誓言。

近日，中国科大中国科学院量子信息与量子科技创新研究院潘建伟、陆朝阳、刘乃乐等教授组成的研究团队与中国科学院上海微系统所、国家并行计算机工程技术研究中心合作，成功构建了255个光子的量子计算原型机“九章三号”，再度刷新了光量子信息的技术水平和量子计算优越性的世界纪录。

量子科技是我国抢占未来产业制高点的重要领域之一，也是中国科大的金字招牌。从世



中国科大郭光灿（左二）教授团队

界首颗量子科学实验卫星“墨子号”，到“九章”“祖冲之号”等量子计算原型机，都发端于一点一滴的基础研究突破。

“做基础研究，中国科大是有传统的。”中国科大校长包信和表示，学校一直鼓励支持做基础研究工作，“冷板凳在中国科大不冷”。

一系列机制的落地有力地验证了这一点。学校逐步建立起以国家实验室、国家研究中心和大科学装置等重大平台为依托，以服务国家战略需求为导向的有组织科研模式，和以学院为基础、以重点实验平台为支撑、以自由探索为主的卓越科技创新体系。

学校还部署原创探索类项目，引导和激励科研人员投身原创基础研究。学校利用中央高校基本科研业务费和“双一流”建设专项资金，设立多梯度校级自主部署项目，重点支持针对国家和中国科学院中长期科学技术发展规划的重点领域或国际重大科技前沿。

通过体制机制创新，中国科大着眼于推动物理学、化学、生命科学、信息科学、材料科学5个一级学科之间的交叉融合，进一步加强合肥微尺度物质科学国家研究中心建设。学校建设几何与物理研究中心、彭桓武理论物理研究中心、安徽省应用数学中心等，加强对前沿基础理论研究工作的支持。

允许学生自主选择专业，夯实人才培养根基

人才培养模式代表一所学校的特色和风格。多年来，中国科大在人才培养上，形成了“基础宽厚实、专业精新活”的鲜明特征。

“在学术方面，要有独立思考的能力。”包信和介绍，中国科大一直以来坚持因材施教的理念，在招生时基本上不分专业方向，就读一至二年级时，学生可以根据自身的兴趣和对学科的理解，自主选择专业和研究方向。学校在数学、物理、化学、生命等基础科学领域和信息、材料等高新科技领域成立了多个科技英才班，为学生发展、基础研究、学科交叉提供了充足的选择空间。

基于此，中国科大形成了富有特色的“两段式（通识与专业教育有机融合的培养模式）、三结合（科教结合、理实结合、所系结合）、长周期（本硕博一体化）、个性化（100%自主选择专业）、国际化”的拔尖创新人才培养模式。

在中国科大，不仅要让学生学得好，还要给学生自主的权利——允许学生100%自主选择专业。本科生在校期间拥有3次自主选专业的机会：入学一年后，根据自己的兴趣在全校范围内选择学院或学科类；大二结束后可在学院或学科内选择专业；三年级后还可以进行专业调整或按个性化修课计划学习。

自由的学习环境、扎实的理论基础、严谨的求学氛围，充分激发了学生探究新知识的动力，让学生树牢做最前沿、最艰深的研究，解决国家和人民迫切需要解决的难题的科研志向。

加速创新成果应用，服务经济社会发展

1970年，中国科大南迁至合肥。53年来，在合肥这座城市创新发展的历程中，中国科大像一粒种子，不断开枝散叶、开花结果。科大讯飞、科大国盾、科大国创等多家“科大系”企业在合肥快速成长，形成产业集群，成为合肥的产业地标。

高校科研成果在城市产业链中的有序孵化，得益于学校的系列顶层设计。

2020年，中国科大被列入首批40家“赋予科研人员职务科技成果所有权或长期使用权”改革试点单位，制定了《关于进一步加强科技成果转化工作的意见》，探索“科技赋权”改革的“中国科大模式”。

党的十八大以来，中国科大推动形成一批量子科技和新一代信息技术等新兴产业集群，为区域经济发展贡献中科大力量。

截至2023年4月底，学校已有超50项成果申请加入赋权改革，批准转化31项成果，涉及130项知识产权，设立高质量创业企业25家，涵盖新一代信息技术、新材料、新能源、生物医药等领域。中国科大先进技术研究院累计培育企业301家，包括国家高新技术企业90家、高成长企业52家，已在人工智能、人工智能、生物医药等领域形成产业创新链条，成为区域高新技术产业生态链的技术引擎。

在包信和看来，要把创新成果推向应用，实际上需要一系列的技术。科技成果转化只有同国家需要、人民要求、市场需求相结合，完成从科学研究、试验开发到推广应用的三级跳，才能真正实现创新价值，实现创新驱动发展。为此，近年来，该校不断强化顶层设计，助力科研成果落地转化。

中国科大紧密结合国家重大战略需求、聚焦基础研究和关键核心技术攻关的需要，通过探索设立青年创新重点基金、创新团队培育基金、原创探索类基金、“揭榜挂帅”项目等，支持学校科研团队“甩开膀子”大胆创新。

2020年，国家提出碳达峰碳中和战略目标。两年后，该校碳中和研究院成立。在研究院支持下，青年教授徐集贤承担了“揭榜挂帅”攻关项目“下一代晶硅叠层太阳能电池技术的开发”。“中国科大鼓励年轻人‘揭榜挂帅’，‘揭榜’的榜单来源于产业运行、企业发展中的真问题、真需求。”谈起学校在方向引导上给予的精准帮助，在团队建设中提供的资金支持，让徐集贤感受颇深。

不久前，徐集贤团队在钙钛矿光伏研究方面的成果创造了新的世界纪录，成为“下一代晶硅—钙钛矿叠层电池”持续探索下的最新成果。

“我们要有决心、有定力，坚持稳定支持、鼓励持续性的科研探索，坚持创新管理、营造良好氛围，从而更好地发挥出科技创新对高质量发展支撑和促进作用，服务于国家重大需求和经济社会发展。”舒歌群说。（原载于《中国教育报》2023年11月2日 记者 方梦宇）