

2020 年基础前沿交叉领域发展 态势与趋势^{*}

刘小平^{1,2} 吕凤先^{*,1}

(1. 中国科学院文献情报中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学经济与管理学院图书情报与档案管理系, 北京 100190)

摘要:基础研究是科技创新的源头。本文聚焦基础前沿交叉领域的发展态势与趋势,从数学及其交叉、物理学及其交叉、化学及其交叉、纳米科技领域,分析世界主要国家/地区 2020 年相关的战略、计划。在遴选重要进展时将学科范围进一步聚焦:在数学及其交叉领域,聚焦数学学科内部的联系以及数学与计算机科学之间的联系;在物理及其交叉领域,聚焦凝聚态物理、原子分子物理和光学物理、粒子物理和核物理、天体物理;在化学及其交叉领域,聚焦合成化学、量子化学、化学生物学以及能源化学等;在纳米科技领域,聚焦碳纳米管的表征和制备、纳米结构的合成、纳米金属材料 and 纳米器件。分析结果显示,美国、欧盟、英国、日本、中国都加大基础研究的投入。美国和英国通过改革基础研究资助机构的方式加强研究成果的转化。2020 年,量子信息科学、人工智能仍是各国关注的重点。除此之外,美国重视半导体、核聚变与等离子体科学,欧盟继续对粒子物理学规划进行调整,英国大力投资国内外数学和物理人才。学科内部和学科之间继续保持交叉融合趋势,计算科学是本文探讨的四个领域的共同交叉领域。学科发展基础、国际合作、大科学装置多要素相互作用共同推动物理学向宏观和微观两极深入发展。化学和纳米科技在发展的过程中,需要提取共性基础研究问题。而对于发展量子信息科技和人工智能的基础研究的广泛讨论的短板,国际和国内学术界对研究前沿的判读,战略制定人员需要结合我国发展现状,与广泛的利益相关方明确短板攻关的次序,以及适合我国的基础研究前沿领域部署。

关键词:基础前沿交叉;战略规划;发展态势;未来趋势

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2021.05.004

Trends of Basic Frontier Research in the Interdisciplinary Field in 2020^{*}

LIU Xiaoping^{1,2} LV Fengxian^{*,1}

(1. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Department of Library, Information and Archives Management, School of Economics and Management,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Basic research is the source of scientific and technological innovation. This paper focuses on the development

^{*} 2020 年中国科学院文献情报能力建设专项“科技领域战略情报研究咨询体系建设”(E0290001)

^{**} Email: lyufx@mail.las.ac.cn

trend of the frontiers of basic research in the interdisciplinary field, and analyzes the relevant strategies and plans of major countries in 2020 from the fields of mathematics and its interdisciplinary, physics and its interdisciplinary, chemistry and its interdisciplinary, and nanotechnology. In maths and its cross fields, this study focuses on the connection between mathematics and computer science; In physics and its cross fields, this study focuses on condensed matter physics, atomic and molecular physics and optical physics, particle physics and nuclear physics, and astrophysics; in Chemistry and its intersection, this study focuses on synthetic chemistry, quantum chemistry, chemical biology and energy chemistry; in Nanotechnology this study focuses on the characterization and preparation of carbon nanotubes, the synthesis of nanostructures, nano metal materials and nano devices. The results show that the United States, the European Union, the United Kingdom, Japan and China have increased investment in basic research. The United States and the United Kingdom strengthen the transformation of basic research achievements through the reform of basic research funding institutions. In 2020, quantum information science and artificial intelligence are still the focus of attention of all countries. In addition, the United States attaches great importance to semiconductor, nuclear fusion and plasma science. The European Union continues to adjust its particle physics program. The United Kingdom invests heavily in mathematics and physics talents at home and abroad. The trend of interdisciplinary integration continues to be maintained within and between disciplines. Computational science is the common interdisciplinary field of the four fields discussed in this paper. The foundation of discipline development, international cooperation and the interaction of multiple elements of large scientific devices jointly promote the development of macro and micro physics. In the development of chemistry and nanotechnology, it is necessary to extract common basic research problems. As for the shortages of extensive discussion on the development of basic research of quantum information technology and artificial intelligence, and the research frontier proposed by the international and domestic researchers, the decisionmakers need to clarify the order of shortcomings as well as deploy the basic research frontiers suitable for China's conditions with a wide range of stakeholders.

Keywords: Frontiers of Basic Research in the Interdisciplinary Field; Strategic Planning; Development Situation; Future Trends

基础研究是科技创新的源头。2020 年 9 月 11 日,习近平总书记在科学家座谈会上指出:我国面临的很多“卡脖子”技术问题,根子是基础理论研究没有搞清楚。2020 年 10 月 26 日,习近平总书记在十九届五中全会上指出:把科技自立自强作为国家发展的战略支撑。2021 年是“十四五”规划的开启之年,我们要继续以习近平总书记关于科技发展的重要论述为指引,以需求为牵引,发展高水平的基础研究。

交叉研究在基础研究中日益发挥重要作用。1995 年,美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)建立数理科学部多学科研究办公室,研究人员开创了生物化学、物理化学等交叉学科。在长期的发展过程中,数学也与“大数据”“演化生物学”“天文学”“人工智能(Artificial Intelligence, AI)”等交叉融合,共同发展。基础前

沿的交叉研究有着解决重要科学问题和重大社会挑战的双重作用。基础前沿研究和交叉研究分别受到各国的重视,而交叉研究也深入发展成为融合研究。适应这一发展趋势,中国科学院在十三五规划中,将基础前沿交叉作为八个重大创新领域之一,数学及其交叉、物理学及其交叉、化学及其交叉是三个重要的研究方向。另外,考虑到纳米科学的学科交叉特征(物理、化学、生物、材料等学科的交叉学科),本文将聚焦基础前沿交叉领域,从数学及其交叉、物理学及其交叉、化学及其交叉、纳米科技等领域分析世界主要国家/地区 2020 年相关的战略、计划,回顾并梳理 2020 年基础前沿交叉领域的重要研究进展,供科研人员与决策者了解基础前沿交叉领域的发展态势与未来发展趋势。

1 2020 年基础前沿交叉领域重要战略规划与科技布局

1.1 美国

1.1.1 美国重申基础研究重要性 拟改革 NSF 推动基础研究成果转化

2020 年 12 月,美国国家科学院发布《无止境的前沿:科学的未来 75 年》报告^[1],再次重申将美国的基础研究与今后几十年的经济增长关联起来的对策建议。报告指出,美国继续增加联邦政府科研经费投入,无论从经济回报还是创造社会就业岗位来看,科学研究都是政府最好的投资回报之一。当前世界环境发生了深刻变化,但基础研究仍然是创新的根基所在,至关重要。

2020 年 5 月,美国国会提出《无尽前沿法案》(Endless Frontier Act)^[2],拟对 NSF 进行结构改革,新增技术理事会,将 NSF 更名为国家科学技术基金会(National Science&Technology Foundation,NSTF)。拟在五年内对 AI 与机器学习(Machine Learning, ML)、高性能计算等十个关键技术领域投资 1000 亿美元。2021 年 5 月,《无尽前沿法案》进入辩论阶段,辩论主要围绕增设技术理事会对 NSF 基础研究使命和文化的影响,是否与美国能源部(Department of Energy, DOE)、美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency,DARPA)现有职能相互重复等问题展开。截至 2021 年 5 月底,对 NSF 增设技术理事会的资金有所削减,但仍然保留着在 NSF 增设技术理事会的建议。另外也有修正案建议加强 DOE 技术转化能力。是基于美国联邦机构现有结构,还是基于改革联邦机构的架构来增加美国基础研究成果转化的能力,还未最终确定^[3]。

1.1.2 基础前沿交叉领域战略部署

1) 数学及其交叉领域相关战略

美国的数学及其交叉领域的战略融合到了先进计算、AI 领域的战略和计划中。

2020 年 10 月,美国国家科学技术委员会发布《开创未来先进计算生态系统:战略规划》^[4]。该战略规划确定美国 DOE、美国国防部和 NSF 为牵头机构,美国 DARPA 和美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology,NIST)等机构支持先进计算领域的基础研究。该战略建议美国研发新计算形式:神经形态、生物启发、量子、模拟、混合计算;实现数据分析和存储的可扩展性,减少延迟,减少 AI/ML 系统处理不确定性、减少漏洞、提高 AI/ML 系统健壮性。目前正在展开的基础研究包含:DARPA、NIST 探索新的先进计算体系结构,支持可信 AI 特征评估研究,DARPA、NSF 开展可扩展系统的原理研究,电子复兴计划,开发异构计算架构和相关理论,数学和计算算法、模型等。

美国于 2019 年 2 月启动了美国 AI 计划,即美国国家 AI 领先战略,要求联邦机构在年度预算中优先考虑 AI 方面的投入。2021 财年财政预算美国重点支持 AI 等领域。NSF 2021 财年用于 AI 研发和跨学科研究机构的预算超过 8.3 亿美元,比 2020 财年预算增加了 70% 以上^[5]。DOE 科学办公室 2021 财年对 AI 和 ML 预算为 1.25 亿美元,比上一财年增加了 76%^[6]。美国农业部和国立卫生研究院(National Institutes of Health,NIH)在 AI 领域也分别预算了 1 亿美元和 5000 万美元。在国防 AI 研发方面,DARPA 投资 4.59 亿美元用于 AI 研发,比 2020 财年增加了 5000 万美元,国防部联合 AI 中心的预算从 2020 财年的 2.42 亿美元增加到 2021 财年的 2.9 亿美元,比上

一财年预算增加了 20%。

2) 物理及其交叉领域相关战略与重要部署

2020 年,美国在物理及其交叉领域的战略融合到了量子科技战略部署当中,还单独发布了聚变能和等离子体领域的十年远景,建立了核天体物理领域的物理前沿中心。

2020 年美国推出了一系列促进和推动量子科技发展的举措,抢占战略制高点。①发布全国性的研究规划。7 月,DOE 发布了《量子互联网蓝图》^[7],计划在 10 年内建成一个全国性的量子互联网;10 月,美国科技政策办公室 (Office of Science and Technology Office, OSTP) 发布了《量子前沿》报告^[8]。②建立包含基础研究信息在内的门户网站。10 月 OSTP 启动一站式门户网站 Quantum. gov,汇集美国政府在量子领域的所有工作,打造“美国国家量子行动计划”之家^[9]。③建立量子研究中心。美国 NSF 和 DOE 在量子信息科学领域建立的研究中心/研究所约 8 家。2020 年,DOE 宣布在未来五年建立另外 5 家研究中心。美国现有的 8 个研究中心^[10],在量子计算、量子通信、量子传感、量子网络、量子器件都有研究布局,其中包含量子力学、原子分子物理学、光学、凝聚态物理等学科的基础研究。

DOE 聚变能源科学咨询委员会为聚变能和等离子体科学领域提供了长达十年的远景^[11],在基础研究领域强调:①研究多尺度、多物理的理论和模型预测聚变试验装置内众多等离子体、材料和工程过程之间复杂相互作用;②开发具有更高磁场、更高工作温度、更高可靠性、简化制造工艺和降低生产成本的磁体;③可适应中子和等离子体环境,集成稳态冷却和长脉冲可靠性的材料;④等离子体动力学的基本理论描述,模拟多尺度行为的数值方法,自组织的、远离平衡的等离子体

的探索和控制。

2020 年 8 月,NSF 建立了原子压力物质中心 (Center for Matter at Atomic Pressures, CMAP) 和中微子、核天体物理和对称性网络 (Network for Neutrinos, Nuclear Astrophysics, and Symmetries, N3AS) 物理前沿中心。CMAP 将获得美国 NSF 为期五年、金额 1296 万美元的资助,将专注于在“气态巨行星”(包括太阳系中的木星和土星)中,氢和氦等元素在极高密度下的行为研究,在极端压力下使物质性质和能量平衡发生巨大变化的能量传输途径等^[12]。N3AS 物理前沿中心的研究包括:在超新星和中子星的中心发现的超致密、富含中子的核物质的描述、中微子、暗物质、核合成、利用高性能计算模拟合并和超新星等^[13]。

1.2 欧洲

1.2.1 欧洲新研发框架——地平线欧洲

2020 年底,欧洲议会批准了向“地平线欧洲 (Horizon Europe)”7 年拨款 955 亿欧元的计划^[14]。“地平线欧洲”计划多个渠道支持基础研究。该计划将通过欧洲研究理事会、玛丽·居里行动计划 (Marie Skłodowska-Curie Actions)、科学和知识服务机构联合研究中心 (Joint Research Centre, JRC) 联合对基础研究提供支持,其中,约 160 亿欧元将拨给欧洲研究理事会 (European Research Council),比此前的“地平线 2020”项目多 20% 以上。“地平线欧洲”计划强调了量子研究,以扩大欧洲在量子技术方面的科学领导地位和卓越性。

1.2.2 欧洲重点发展 AI、量子科技、粒子物理学前沿领域

欧洲在数学及其交叉领域的战略部署融合到了 AI 领域的计划中。而物理及其交叉领域的规划融合到了量子技术的发展规划中,还单独发布

了粒子物理学领域的战略。

AI 领域。2020 年 2 月,欧盟委员会发布了《AI 白皮书:欧洲追求卓越和信任的方法》^[15],指出欧盟在神经形态计算、高性能计算、边缘计算和量子计算领域的基础将推动其在 AI 领域的发展和领先地位。5 月,欧盟委员会在一项名为“欧盟下一代”的复苏计划提案中,提出了投入 610 亿欧元以刺激和引导私营资本加大对 5G、AI 等数字经济的投资的举措。

量子科技。2020 年德国政府决定投入 20 亿欧元发展量子技术,建造 3 台量子计算机。欧洲目前有 24 个国家联合开发量子通信联合基础设施^[16]。粒子物理学领域,欧洲核子研究中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)发布《2020 欧洲粒子物理学战略》^[17],聚焦建造“希格斯工厂”和开发新的加速器技术,搜寻暗物质、探索味物理和基本对称性,继续支持理论物理学研究,支持探测器研发和相关基础设施,支持粒子物理学研究中的软件和计算基础结构。

1.3 英国

1.3.1 重视具有变革性的研究

面向高风险、高回报的科学研究,英国政府将投资至少 8 亿英镑,建立一个运作模式仿效美国 DARPA 的基金机构,减少研究人员的行政负担,尝试不同的融资模式和资助模式(项目资助、种子资助和奖金激励),根据项目的成功启动和停止项目,在必要时重新引导资金,对失败的容忍度高。预计 2022 年启动该机构^[18]。

英国科学技术委员会给出了登月型研究的七条原则:1)激发和激励公众、学术界和工业界;2)帮助解决一个重要的社会问题;3)真正具有颠覆性和开创性;4)把重点放在确定可实现重大突破的基础科学领域;5)具体和明确的目标,并有明

确的完成时间表;6)利用英国目前或即将成为世界领先者的领域;7)产生显著的附加效益。

1.3.2 物理与数学领域的政策 and 研究部署

英国在数学和物理领域的政策和研究部署融合到了物理和数学的人才培养政策部署、对量子科学和技术的项目部署中。2020 年 3 月,英国政府投资 1.79 亿英镑资助英国 40 多所大学培养物理科学、数学和工程专业的博士。英国政府授予首批史蒂芬·霍金研究员,支持其进行物理学、数学和计算机科学的交叉突破性研究,挑战当前的假设,推进科学知识,并通过他们的发现激励公众^[19]。未来五年,政府将针对数学研究资助 3 亿英镑,以吸引全球最优秀的人才,资金将用于资助博士、增加数学奖学金和研究项目^[20]。英国处于量子技术计划的第二阶段,在量子计算领域开展大量研究。英国从 2013 年起开始实施英国国家量子及技术计划,致力于量子创新商业化和确保英国在量子科学和技术领域的世界领先地位。计划分为两个阶段,第一阶段,2014—2019 年,英国总计投入 3.8 亿英镑^[21]。现在这一计划处于第二阶段,累计投资已经达到 10 亿英镑。2020 年 6 月,英国政府向 38 个项目投资 7000 万英镑,大约三分之一的项目涉及量子计算,例如,开发世界首个量子计算机,基于量子技术克服电池材料设计的局限性等^[22]。

1.4 日本

日本重视基础研究的作用,强调基础研究跨学科跨领域的整合,重视数字化转型。主要通过基础设施和平台建设、开放合作、机制完善与科研环境创设支持基础研究,尤其注重开放合作与平台建设两种政策工具。

日本在数学和物理的相关战略融合在了 AI 和量子技术的战略中。日本推动 AI 领域的基础

研究。日本计划在 AI 基础理论与技术、终端与设计、可靠的高质量及系统要素等 4 个方面启动重点研发项目^[23]。其中, AI 相关基础理论研究和融合性集成创新技术研发是构成 AI 研发的核心基础。在 AI 基础理论研究与技术研发领域, 主要针对现阶段的深度学习尚不能完全解决的一些难题、语言和声音处理技术、采用人脑模型的 AI 技术进行重点研发。边缘计算、云计算、量子计算等计算科学也是其中的重要研究方向。日本制定《量子技术创新战略》, 作为未来 10 ~ 20 年的国家重要战略之一。2020 年 1 月, 日本统合创新战略推进会议发布《量子技术创新战略(最终报告)》^[24]指出, 日本的产业界、学术界和政府部门将一起共同合作努力, 以强有力地促进和制定从研发到社会实施的广泛计划。日本重点关注的量子技术领域包括: 量子计算机与量子模拟、量子测量与量子传感、量子通信与密码学、量子材料、量子 AI 技术、量子生物技术、量子安全技术等。《量子技术创新战略》还指出, 量子技术仍处于基础研究阶段, 稳定地促进研发是极其重要的。日本将进一步加强包括量子技术及其外围技术, 例如微观结构分析、微细加工技术、光波控制/光学设备技术、半导体技术、稀释冰箱冷却技术、低温电子技术、分析和需求评估技术等基础研究, 同时稳步推进基础设施和设备的开发和共享。

1.5 中国提高基础研究资助比例 推动新形势下基础研究发展

我国在基础研究领域的改革主要以增加投入、优化布局和管理等作为切入点。我国 2020 年基础研究经费 1504 亿元, 比 2019 年的 1336 亿元增长了 12.6%。2020 年 4 月, 科技部、财政部、教育部、中科院、工程院、自然科学基金委共同制定了《新形势下加强基础研究若干重点举措》^[25], 提

出优化基础研究总体布局、激发创新主体活力、深化项目管理改革、营造有利于基础研究发展的创新环境和完善基础研究支持机制五大重点举措。中国正在制定《基础研究十年行动方案(2021—2030)》, 对未来十年中国基础研究的发展作出系统部署和安排, 重视基础前沿研究中和应用中提炼的科学问题。

2 基础前沿交叉领域重要进展

2.1 数学及其交叉领域重要进展

2020 年 9 月, 英国科学家因为在随机分析理论中做出了突破性贡献, 尤其是随机偏微分方程中的正则性结构理论获得了数学突破奖^[26]。此外, 《量子杂志》(Quanta Magazine) 等网站还遴选了数学领域 2020 年的重要进展^[27]。近年来数学与“大数据”“演化生物学”等学科交叉融合发展。本部分将依据数学的学科交叉特征以及 2020 年的重要进展分析数学学科内部, 数学与计算机科学的紧密联系。

2.1.1 数学各分支领域之间紧密联系

朗兰兹纲领是数学中一系列影响深远的构想, 联系数论、代数几何与约化群表示理论, 是中国科学院在十三五规划中部署的重要方向之一。2018 年, 美国和法国的研究人员将朗兰兹纲领延伸到椭圆曲线以外, 证明了无穷多个阿贝尔曲面 A 在 Q 上的模特征。目前, 研究人员正致力于从两个方面扩展朗兰兹纲领: 在丢番图方程方面, 研究指数大于 6 的方程, 以及两个以上变量的方程; 研究比目前更复杂的对称空间上的自守形式。加拿大研究人员使用了另一个著名的桥梁——将多项式连接到幂级数——来精确地量化多项式的某些数值解如何在几何上相互排斥。德国和美国的研究人员展示了将称为群的复杂对象与更简单的

矩阵概念联系起来。中国科学技术大学攻克了哈密尔顿—田猜想和偏零阶估计猜想,对几何分析,尤其是里奇流的研究产生了深远的影响。

2.1.2 数学与计算机科学的深度融合

数学与计算机科学之间的融合以多种形式体现。1) **计算机科学领域问题的解决推动数学问题求解**。2020 年 1 月,美国和加拿大的五位计算机科学家证明 $MIP^* = RE$,证明科学家们可以用量子纠缠的量子计算机从理论上验证一系列问题的答案。基于这个证明,研究人员最终解决了一个纯数学领域的问题——证明了孔涅嵌入猜想(the Connes Embedding Conjecture)是错误的。2) **数学家和计算机科学家共同破解数学问题**。2020 年 12 月,一个由美国数学家和计算机科学家组成的团队,证明了凯勒猜想在七维空间中仍然正确。3) **计算机科学家解决数学问题**。“三个公用设施问题”从数学角度看是一个图论问题,与图论中的可平面图概念有关。2020 年 6 月,丹麦计算机科学家找到了能以指数级改进可平面性的算法,用最快速度解决该图论问题。4) **数学家基于计算机科学解决数学问题**。2020 年 5 月,美国数学家等利用将图形与现代计算机方法结合,证明了由五边形组成的正十二面体,不仅存在“从一个顶点出发可以返回这个顶点,且无需经过其他任何顶点”的直线路径,而且这样的直线路径存在无数条。5) **微软开发的 AI 工具 Lean 被世界范围的科学家用于解决数学领域的前沿问题**。

2.2 物理学及其交叉领域重要进展

物理学及其交叉领域重点聚焦弦理论物理、凝聚态物理、原子分子物理和光学物理、粒子物理和核物理、天体物理的重要进展。在对重要进展进行遴选时,综合了世界著名物理奖项以及《科学》《自然》杂志发表的论文。重要物理奖项主要

包含费米奖、沃尔夫物理学奖、富兰克林奖、狄拉克奖、古斯塔夫·赫兹奖、马克斯·普朗克奖、樱井奖、波兹曼奖等,其中沃尔夫物理学奖、富兰克林奖是综合类的奖,古斯塔夫·赫兹奖是德国颁发给青年科学家的奖,狄拉克奖和马克斯·普朗克奖是颁发给理论物理领域的奖,费米奖是核物理领域的,樱井奖是粒子物理学奖。

2.2.1 弦理论研究人员获狄拉克奖

2020 年的狄拉克奖授予了法国、美国和意大利的三位科学家。他们在对弦理论的创立和形式化表述方面做出重要贡献^[28]:针对玻色弦,建立“闭弦”数学模型,和“开弦”数学模型一起完美地描述了弦的物理学。研究了“闭弦”数学模型的对称性,发展了“Virasoro 代数”。在此基础上,把费米子自由度引入模型,并将描述玻色弦的对称代数——Virasoro 代数推广到同样可以描述费米子的代数。

2.2.2 凝聚态物理学的超导和拓扑物态研究等领域深入发展

凝聚态物理领域的重要进展主要从超导、马约拉纳费米子、拓扑物态这三个领域遴选,这三个领域是凝聚态物理学科在国际上获得突破较大、获得奖项多、受到关注多的领域,也是我国重点发展的领域。

超导。1) 美国研究人员在相当于地心压力四分之三的环境(267Gpa)下,实现了碳硫氢化物室温(15℃)的超导电性,上一个超导记录,是德国研究人员将镧和氢的混合物压缩到 170GPa,在 250K(-23℃)的温度下产生超导电性。2) 美国研究人员合成了 Ba_3NbS_5 交替层保护的二维超导体二硫化铌(NbS_2)的结构^[29],二硫化铌层中的电子迁移率,比未受保护的对应层中的电子迁移率高出三个数量级。

固体材料中的新奇费米子研究是凝聚态物理领域的一个热点。研究人员在固体材料中发现了超越宇宙对称性保护下存在的奇异准粒子,如沙漏费米子、马约拉纳费米子、三重简并费米子等,但马约拉纳费米子的研究仍需要深入^[30]。马约拉纳费米子以准粒子激发的形式存在于超导体里,它可以用来形成具有非阿贝尔统计的马约拉纳束缚态。1) 美国和德国的研究人员制造了多个量子反常霍尔绝缘体和超导体组成的异质结构样品,观察到异质结构中的超导邻近效应,但并未发现由马约拉纳费米子诱导的半量子化电导平台^[31]。2) 美国和中国的研究人员为铁基超导体的拓扑超导性和马约拉纳准粒子的沿畴壁的传播提供了有力的证据^[32]。3) 中国和美国的研究人员在铁基超导体 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 中观察到马约拉纳束缚态,还在铁基超导体 $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ 薄膜中发现零能束缚态。

拓扑物态。1) 本征材料中发现量子反常霍尔效应。美国和日本的研究人员在与六方氮化硼对齐的扭曲双层石墨烯中发现量子反常霍尔效应^[33],中国研究人员在反铁磁层状拓扑绝缘体 MnBi_2Te_4 中发现量子反常霍尔效应^[34]。2) 高阶拓扑绝缘体边和角的表征。美国研究人员测量了旋转对称二维超材料中边界局域化的分数电荷密度,引入分数电荷密度作为拓扑指示符识别高阶拓扑态^[35]。3) 拓扑半金属。瑞士、德国、西班牙等国的研究人员在拓扑半金属手性晶体钼镓 (PdGa) 中观察到具有保护的节带简并特征,即拓扑不变量陈数 (Chern Number) 是 4 (现有观测值 1 或者 2)^[36]。4) 基于扭曲双层石墨烯的拓扑绝缘体。美国和日本科学家基于角度扭曲的双层石墨烯的材料,相互作用的电子产生“拓扑量子态”——拓扑绝缘体,且电子在边缘流动时不会受到任何

缺陷或变形的阻碍^[37]。

2.2.3 原子分子物理学领域

原子分子物理学领域的研究方向参考美国科学院 2019 年完成的《操控量子系统:美国原子分子物理和光学评估》的报告,从《科学》杂志和物理重要奖项中遴选这些方向中的重要进展。在《科学》杂志检索时以“激光”“阿秒”“光学钟”“原子钟”“核时钟”“光子和量子”等为检索策略。

光工具。1) 高强度激光器——更快、更小、更便宜。2020 年的富兰克林物理学奖章授予了美国的两位科学家,奖励其在高强度激光器创下了速度记录,比以往任何时候都更快更小且更便宜,这一研究使高强度 X 射线源实用化,并广泛用于研究各种物理化学过程,包括时间尺度为万亿分之一秒的化学反应^[38]。2) 涡旋微激光器——低能耗、高速度、轨道角动量可调。中国和美国等国的研究人员,发现钙钛矿型涡旋微激光器可以同时实现低能耗和高速输出,涡旋光束激光与线偏振光束激光可以互相转换,转换时间为 1 到 1.5 皮秒,能量消耗比以前的全光开关低几个数量级^[39]。美国和意大利等国的研究人员基于纳米光子学的方法,产生和检测具有任意轨道角动量的激光^[40]。

基于原子分子物理的精密测量。1) 更高的时间分辨率,隧穿显微术中电子的阿秒相干操纵。德国和瑞士的研究人员证明了扫描隧道显微镜隧道结中电子的相干控制。研究表明,在原子尺度上诱导、跟踪和控制电子流是可能的,并且具有亚微秒的分辨率,这为发展拍赫兹 (petahertz) 相干纳米电子学和显微镜提供了一条途径。2) 将阿秒科学应用于液相。瑞士和德国的科学家将阿秒科学应用于液相,测量了在光子能量为 21.7

到 31.0 电子伏时,液态水和气态水的光电发射之间 50 到 70 阿秒的时间延迟^[41]。**3) 稳定的微波波段的光学原子钟。**美国研究人员实现基于 10 千兆赫兹的微波信号的光学原子钟,微波信号的相位精确跟踪光学时钟相位,在电子域产生 1×10^{218} 的绝对分频不稳定性^[42]。**4) 核时钟。**德国的古斯塔夫·赫兹奖颁发给德国路德维希马克西米利安大学慕尼黑分校,以奖励其首次直接和精确地测定钍-229 异构体的激发能,该研究可作为未来实现核时钟的基础^[43]。

基于光子的量子计算优势研究。中国研究人员将 50 个不可分辨的单模压缩态送入 100 模式全连通随机矩阵超低损耗干涉仪中,用 100 个高效率的单光子探测器对输出进行采样,获得 76 个光子、约 10^{30} 个状态空间维度,这一采样率比使用最先进的经典模拟策略和超级计算机快约 10^{14} 倍。

2.2.4 粒子物理和核物理

标准模型粒子。2020 年的 J. J. 樱井理论粒子物理学奖授予了美国威斯康星大学麦迪逊分校的科学家,他们开发了在对撞机上发现标准模型粒子和测试它们相互作用的策略。

超出标准模型的新粒子或新物理学。1) 任意子。法国、芬兰等国家的研究人员在砷化镓/砷化铝镓(GaAs/AlGaAs)的二维电子气中建立了一个任意子对撞机,两束任意子在分束器处发生碰撞,然后在两个输出处退出装置,研究人员研究了输出端电流波动的相关性,揭示了任意子的统计特征。**2) 希格斯玻色子。**CERN 的 ATLAS 和 CMS 实验新结果表明希格斯玻色子衰变为两个 μ 子^[44]。**3) 奇异结构的四夸克粒子。**CERN 首次观察到由两个粲夸克和两个反粲夸克组成的奇异结构的四夸克粒子^[45]。

原子核可以作为一个“实验室”来精确检验标准模型中的基本对称性和寻找超出标准模型的新物理。英国研究人员证实了原子核的八极形变^[46],将推动超越粒子物理标准模型的物理学。美国研究人员发现了铯-73 和溴-73 中束缚核基态的镜像对称性破坏的证据,观察结果与研究作用于原子核的电荷对称破缺力提供了新的见解^[47]。

2.2.5 天体物理学领域

黑洞、暗物质、引力波是天体物理学领域的研究热点。

2020 年是黑洞研究成果卓著的一年,物理学家正处于了解黑洞的黄金时代。2020 年诺贝尔奖物理学奖颁给了三名研究黑洞等神秘宇宙天体的物理学家,表彰其发现黑洞;4 月美国激光干涉引力波天文台-欧洲处女座干涉仪(The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory-Virgo interferometer, LIGO-Virgo)团队宣布,观测到了最不对称的黑洞并合;5 月 LIGO-Virgo 团队宣布,发现迄今为止观测到的最大质量黑洞碰撞;9 月科学家发表论文讨论可能存在“极大质量黑洞”;10 月意大利、美国和西班牙的天文学家用甚大望远镜观测星系与黑洞,推测其起源。

暗物质。1) 暗物质模型。意大利和美国等国的研究人员研究了 11 个星系团中的小尺度的暗物质产生的引力透镜效应,观测结果相比于冷暗物质模型预测的结果高出一个数量级^[48]。**2) 暗物质直接观测。**2020 年,意大利装有 8 吨冷态液态氙的“氙-NT”探测器被启用;美国装有 10 吨液态氙的“LUX-ZEPLIN”探测器也启动。目前,我国采用液氙探测技术的 PandaX (Particle and Astrophysical Xenon Experiments) 暗物质实验,也将有效探测质量提高到数吨的水平提高暗物质寻

找灵敏度。3) 暗物质间接探测。西班牙研究人员发明了一种新的原子磁计,用来探测轴子暗物质粒子^[49]。我国研发了暗物质粒子探测卫星 (Dark Matter Particle Explorer, DAMPE), DAMPE 数据观测到超出平滑背景预期的尖锐信号和 93 个正负电子对,还需要寻找强有力的证据证明这些信号来自暗物质^[50]。

引力波。2020 年,我国发射引力波暴高能电磁对应体全天监测器卫星(又名“极目”)追踪引力波伴随的电磁信号^[51]。

2.3 化学及其交叉领域重要进展

2020 年底,美国《化学化工新闻》(*Chemical & Engineering News*, C&EN) 期刊总结了发表在《自然》《科学》《美国化学会志》等顶级期刊上的具有重大意义的顶级研究成果,2020 年化学前沿研究成果产生在合成化学、量子化学、化学生物学以及能源化学等领域。

2.3.1 合成化学

2001 年诺贝尔化学奖得主野依良治认为,合成化学的未来向兼顾经济、安全、环境友好、节省资源和能源方向发展。2020 年的合成化学领域的进展体现了这一特点。同时,合成化学发展也受到计算科学发展的推动。

石墨烯、长链多糖、酰胺合成。美国科学家通过焦耳热闪蒸技术可以将任何来源的碳在不到 100 毫秒的时间内转化成石墨烯,并实现克级制备^[52]。德国科学家在自动多糖合成装置中,仅用 188 小时就合成出了 100 个链段长度的多糖碳水化合物,收率为 5%;研究人员还将合成的 30 和 31 个链段长度的寡糖通过偶联反应制备出 151 个链段长度的枝链聚甘露糖苷,收率 41%。这一研究将促进生物和材料科学的发展^[53]。2020 年 9 月,美国科学家通过多种技术改造面包酵母来

使其生物合成托烷生物碱类以及莨菪生物碱类药物。该方法有望取代生物提取方法,是一种环境友好型策略^[54]。胺与羧酸偶联形成酰胺键是发现药物最常用的化学反应,美国科学家通过计算表明,胺和酸可以有数百个转换耦合,并通过实验证明了十几个这样的反应的应用^[55]。

2.3.2 化学理论与机制——化学模拟/量子化学

化学模型的建立需要对所研究的问题有全面和深入的了解,还需要与数学家和计算机科学家合作解决问题。2013 年,诺贝尔化学奖奖励了在多尺度化学系统模型领域做出突出贡献的科学家。2020 年化学模拟中的重要进展借助了量子模拟。2020 年 8 月,谷歌的 AI 量子机器人使用 10~12 个量子比特,采用变分量子本征解算器,在空间三个方向上模拟了重氮化合物的异构化^[56]。

2.3.3 能源化学和化学生物学

能源和健康是人类未来面临的重要挑战。

2020 年,美国科学家将聚 3,4-乙烯二氧噻吩 (PEDOT) 与普通红砖结合,研发出了一种可存储电能的超级电容器电极。这一成果有望作为静态电能存储单元并与房屋整合。例如,一面墙的某块区域可作为充电模块,直接为接入其中的手机、电脑等电子产品供电^[57]。

德国科学家深入研究 100 种生物学物种,发现了超过两百万种多肽和超过 340000 种新的蛋白质,是科学家以前鉴定的蛋白质总数的两倍。该结果提供了可以比较整个进化范围内生物体功能组织特点的机会,有利于促进蛋白质组学的发展,进一步加深人们对不同物种进化过程的理解^[58]。美国科学家描述了一个微环境映射平台,该平台利用光催化卡宾生成来选择性地识别细胞膜上的蛋白质-蛋白质相互作用。通过使用光催

化剂 - 抗体偶联物在空间上定位卡宾生成,证明了抗体结合靶标及其微环境蛋白邻居的选择性标记。这项技术确定了活淋巴细胞中程序性死亡配体微环境的组成蛋白,并在免疫突触连接处选择性标记^[59]。

2.4 纳米科技领域重要进展

纳米科技领域的进展主要从《科学》杂志遴选,以“Nano”为关键词检索,对“碳纳米管表征和制备”“纳米结构合成”“纳米器件”这三类论文数量较多的进展进行汇总,同时还选取了我国在“纳米金属材料”领域的重要进展。

2.4.1 碳纳米管表征和制备

碳纳米管具有重量轻、机械强度大、导热性和导电性好、稳定性好等特点,但是针对在反复暴露于亚临界载荷后可能失效的问题,了解疲劳的原因是延长使用材料寿命的关键,碳纳米管的生长也是对碳纳米管不断增长的工业需求的主要挑战。在碳纳米管表征和制造的研究中,中国研究人员发现碳纳米管具有优异的抗疲劳性能,这一性能与温度有关,碳纳米管的疲劳断裂时间主要取决于第一缺陷产生的时间^[60]。中国研究人员在 10 厘米的硅片上制备出排列良好的碳纳米管阵列,密度达到每微米 100 到 200 个碳纳米管。使用离子液体门控,性能指标超过了具有类似尺寸的传统硅晶体管^[61]。美国研究人员通过使用单链 DNA 手柄包裹碳纳米管,并将其结合到 DNA 砖中,形成了一系列通道,精确的管间距小到 10.4 纳米,将碳纳米管阵列连接到聚合物模板硅片上,构建了具有高的导通性能和快速的开关特性的单通道和多通道场效应晶体管。日本科学家创造了长度 14 厘米的碳纳米管“森林”,是传统碳纳米管阵列中纳米管最大长度的 7 倍^[62]。

2.4.2 纳米结构的合成

美国、德国、波兰和卢森堡的科学家合作,提

出了一种直接在半导体金属氧化物表面形成原子级精确的石墨烯纳米带的表面合成方法^[63]。美国研究人员通过对硫化铜纳米棒前驱体进行七个连续的阳离子交换反应,定义了合成 65520 个不同的多组分金属硫化物纳米棒的可行途径^[64]。美国和中国的研究人员合作,发现了金、铂和钯纳米颗粒中形成五倍孪晶的两种不同途径。该研究成果可以用于开发适合各种应用的纳米颗粒^[65]。西班牙、比利时和美国的研究人员合作,证明在金纳米粒子的种子生长过程中,尤其是对于高度各向异性的纳米棒,可以诱导形态手性,研究为制备具有高手性光学活性的纳米颗粒提供了一种可重复、简单和可扩展的方法^[66]。韩国、澳大利亚、美国的研究人员合作,基于三维液胞电子显微镜重建了一批处于溶液环境中的单个合成纳米晶体的结构^[67]。

2.4.3 纳米金属材料

除了在纳米制备领域我国取得的进展之外,2020 年,在纳米金属材料领域我国继续取得重要进展,在含有 10nm 晶粒的铜中发现了一种最小的界面结构,当与纳米晶粒晶体孪晶网络结合时,该结构在接近熔点的温度下仍能保持高强度。在 2000 年和 2004 年,我国同一机构在纳米金属的延展性、利用纳米尺寸的孪晶强化金属强度和导电性方面即取得重要进展。

2.4.4 纳米器件

1) 美国研究人员在室温下使用半导体纳米线精确设计不对称纳米线电子棘轮,优先在一个方向传导电流,在室温下表现为高频几何二极管,克服了更多传统器件的限制,可应用于能量收集和信号处理技术领域^[68]。2) 西班牙、美国、法国、葡萄牙、巴西的研究人员合作,开发了一种单纳米尺度的石墨烯等离子体声腔装置^[69],腔体可以从

远场有效地激发,并且可以在非常大的宽带光谱上进行电调谐。研究提供了一个研究超强耦合现象的平台,还可以应用于研发长波长光谱高效探测器和传感器的领域。3)英国和澳大利亚的研究人员开发了一种基于交叉纳米线(排列成散列结构)的太赫兹探测器,能够分辨太赫兹光的全部状态(强度和偏振等)^[70]。

3 基础研究发展趋势与建议

3.1 基础研究政策动向

美国、欧盟、英国、日本、中国都加大基础研究的投入。美国和英国通过改革基础研究资助机构的方式加强研究成果的转化。量子信息科学、AI 是各国关注的重点,这两个技术领域的发展需要以多学科交叉为基础,还需要注重基础研究的成果转化。除此之外,美国重视半导体、核聚变与等离子体科学,欧盟继续对粒子物理学进行规划,英国大力投资国内外数学和物理人才。

3.2 基础前沿交叉学科发展趋势

学科内部与学科之间表现出联系日益紧密的趋势,这一趋势让学科的发展更趋向于其本质。计算机学科作为一个本文中所讨论的四个领域都有交叉的学科,正向这四个领域渗透,计算设施正逐渐成为与大型科学基础设施相互并列的一个基础设施。物理学研究不断向超微观方面深入和超宏观拓展,在这一过程中,基于学科发展基础、开展国际合作、建立运营大科学装置的组合措施将发挥重要的作用。

3.3 建议

化学不断与生物学、能源、量子计算等深度融合,纳米科技重视基础研究,同时重视应用研究和产业化。化学和纳米科技的发展在解决能源、健康等重大社会挑战中发挥重要作用。结合任务导

向型项目在发展中易于出现的问题,在部署化学和纳米科技领域的任务导向型的项目过程中,需要注意识别并资助共性科学问题,以基础研究的深入发展推动高质量的成果转化,避免资源重复投入。

基础前沿交叉研究促进量子信息科学技术和 AI 等变革性技术发展。量子计算基于光子、超导、超冷原子等物理体系作为量子位,阿秒测量、原子钟、核时钟等的深入研究将推动量子精密测量发展。数学模型将与 AI 融合发展。我国在 AI 的基础研究中,有一些较为公知的短板问题,我国学者和国外的机构也发布 AI 和量子信息科学技术的基础研究需要解决的问题或者是发展路线。然而,如何识别和明确这些研究短板的优先次序或者整体布局,将国际上提出的发展量子信息科学技术的基础研究的前沿与我国现有研究基础相互结合,以及基于此制定我国发展这两个技术相关的基础研究学科的政策,则需要发展量子信息科学技术、AI 技术的政策制定者与广泛的利益相关方共同协商确定。

参考文献

[1] The National Academy of Sciences. The Endless Frontier;The Next 75 Years in Science[EB/OL]. (2020-12-17) <https://www.nationalacademies.org/news/2020/12/future-of-us-science-policy-legacy-of-science-the-endless-frontier-discussed-in-new-publication>.

[2] CONGRESS. Endless Frontier Act [EB/OL]. (2020-05-21). <https://www.congress.gov/116/bills/s3832/BILLS-116s3832is.pdf>.

[3]世界科技研究与发展公众号. 美国参议院专门委员会通过《无尽前沿法案》[EB/OL]. (2021-

05-19). <https://mp.weixin.qq.com/s/tF5gp-h5OzuKthLNn0Y3HQ>.

The Official Account of World Sci-Tech R&D. The Senate Committee Passed the Endless Frontier Act [EB/OL]. (2021-05-19). <https://mp.weixin.qq.com/s/tF5gp-h5OzuKthLNn0Y3HQ>.

[4] NITRD. Pioneering the Future Advanced Computing Ecosystem; A Strategic Plan [EB/OL]. (2020-11-18). <https://www.nitrd.gov/pubs/Future-Advanced-Computing-Ecosystem-Strategic-Plan-Nov-2020.pdf>.

[5] NSF. National Science Foundation. FY 2021 Budget Request to Congress [EB/OL]. (2020-02-10). <https://www.nsf.gov/about/budget/fy2021/index.jsp>.

[6] DOE. DEPARTMENT OF ENERGY FY 2021 BUDGET REQUEST FACT SHEET [EB/OL]. (2020-02-10). <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/02/f71/DEPARTMENT%20OF%20ENERGY%20FY%202021%20BUDGET%20REQUEST%20FACT%20SHEET.pdf>.

[7] Quantum. gov. QIS-Quantum Information Science [EB/OL]. [2021-03-11]. <https://www.quantum.gov/about/>.

[8] Quantum. gov. QIS CENTERS [EB/OL]. [2021-03-11]. <https://www.quantum.gov/action/#QIS-CENTERS>.

[9] DOE. U. S. Department of Energy Unveils Blueprint for the Quantum Internet at ‘Launch to the Future; Quantum Internet’ Event [EB/OL]. (2020-7-23). <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-unveils-blueprint-quantum-internet-launch-future-quantum-internet>.

[10] OSTP. Quantum Frontiers Report on Community Input to the Nation’s Strategy for Quantum Information Science [EB/OL]. (2020-10-07) <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/QuantumFrontiers.pdf>.

[11] OSTI. Powering the Future Fusion and Plasmas [EB/OL]. [2021-03-11]. https://science.osti.gov/-/media/fes/fesac/pdf/2020/202012/DRAFT_Fusion_and_Plasmas_Report_120420.pdf.

[12] University of Rochester. NSF Awards MYM13 Million for Multi-university Initiative to Explore ‘Revolutionary States of Matter.’ [EB/OL]. (2020-08-10). <https://www.rochester.edu/newscenter/rochester-leads-effort-to-understand-matter-at-atom-crushing-pressures-447762/>.

[13] Berkeley Lab New NSF Physics Frontier Center Will Focus on Neutron Star Modeling in ‘Gravitational Wave Era’ [EB/OL]. (2020-08-17). <https://newscenter.lbl.gov/2020/08/17/new-nsf-physics-frontier-center-will-focus-on-neutron-star-modeling-in-gravitational-wave-era/>.

[14] European Commission. Commission Welcomes Political Agreement on Horizon Europe, the Next EU Research and Innovation Programme [EB/OL]. (2020-12-10). https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_2345.

[15] European Commission. White Paper on Artificial Intelligence; a European Approach to Excellence and Trust [EB/OL]. (2020-2-19). https://ec.europa.eu/info/publications/white-paper-artificial-intelligence-european-approach-excellence-and-trust_en.

[16] 科技部. 欧盟 24 个成员国共同开展量子通信

- 基础设施计划 [EB/OL]. (2020-04-01).
http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/202004/t20200401_152765.htm.
Ministry of Science and Technology. 24 EU Member States Jointly Launch Quantum Communication Infrastructure Project [EB/OL]. (2020-04-01). http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/202004/t20200401_152765.htm.
- [17] CERN. 2020 Update of the European Strategy for Particle Physics [EB/OL]. (2020-06-19).
<https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2020-06/2020%20Update%20European%20Strategy.pdf>.
- [18] GOV. UK. UK to Launch New Research Agency to Support High Risk, High Reward Science [EB/OL]. (2021-02-19).
<https://www.gov.uk/government/news/uk-to-launch-new-research-agency-to-support-high-risk-high-reward-science>.
- [19] GOV. UK. Multi-million Government Investment in the Future of UK Science [EB/OL]. (2020-03-06) <https://www.gov.uk/government/news/multi-million-government-investment-in-the-future-of-uk-science>.
- [20] GOV. UK. Boost for UK Science with Unlimited Visa Offer to World's Brightest and Best [EB/OL]. (2020-01-27) <https://www.gov.uk/government/news/boost-for-uk-science-with-unlimited-visa-offer-to-worlds-brightest-and-best>.
- [21] 于笑潇. 英国国家量子技术计划的特点和启示 [J]. 中国基础科学, 2020, 22 (4) : 51-55.
YU Xiaoxiao. Characteristics and Enlightenment of the National Quantum Technology Plan in England [J]. China basic science, 2020, 22 (4) : 51-55.
- [22] GOV. UK. £ 70 Million Funding to Secure UK Position as a World-Leader in Quantum Technology [EB/OL]. (2020-06-15). <https://www.gov.uk/government/news/70-million-funding-to-secure-uk-position-as-a-world-leader-in-quantum-technology>.
- [23] 刘平, 刘亮. 日本新一轮人工智能发展战略——人才、研发及社会实装应用 [J]. 现代日本经济, 2020, 39 (6) : 36-47.
LIU Ping, LIU Liang. A New Round of AI Development Strategy in Japan: Talent, R & D and Social Application [J]. Modern Japanese economy. 2020, 39 (6) : 36-47.
- [24] 日本统合创新战略推进会议. 量子技術イノベーション戦略 最終報告 [EB/OL]. (2020-01-21). <https://www8.cao.go.jp/cstp/siryohaihui048/siryohaihui048-2.pdf>.
Japan Integrated Innovation Strategy Promotion Conference. Quantum Technology Innovation Strategy Final Report [EB/OL]. (2020-01-21).
<https://www8.cao.go.jp/cstp/siryohaihui048/siryohaihui048-2.pdf>.
- [25] 国家自然科学基金委. 自然科学基金委员会同有关部门关于印发《新形势下加强基础研究若干重点举措》的通知 [EB/OL]. [2020-04-29].
<http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab434/info77851.htm>.
NSFC. Notice of NSFC and Relevant Departments on Printing and Distributing Several Key Measures for Strengthening Basic Research under the New Situation [EB/OL]. [2020-04-29].
<http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab434/info77851.htm>.
- [26] Breakthrough Prize. Winners of the 2020

Breakthrough Prizes in Life Sciences, Fundamental Physics and Mathematics Announced [EB/OL]. [2021-03-11]. <https://breakthroughprize.org/News/54>.

[27] Quanta Magazine Quanta's Year in Math and Computer Science (2020) [EB/OL]. (2020-12-23) <https://www.quantamagazine.org/quantas-year-in-math-and-computer-science-2020-20201223/>.

[28] ICTP - 2020 Dirac Medal Winners Announced [EB/OL]. (2020-08-10). <https://www.ictp.it/about-ictp/media-centre/news/2020/8/ictp-dirac-medal-2020-announced.aspx>.

[29] SCHOOP L. M. Layer-cake 2D Superconductivity [J]. Science, 2020, 370(6513): 170-170.

[30] 中国科学院物理研究所. 铁基超导体中马约拉纳束缚态的发现 [EB/OL]. (2018-08-17). http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/201808/t20180817_5056877.html.
Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences. Discovery of Majorana Bound State in Iron Based Superconductors [EB/OL]. (2018-08-17). http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/201808/t20180817_5056877.html.

[31] KAYYALHA M, XIAO. Di, ZHANG Ruoxi, et al. Absence of Evidence for Chiral Majorana Modes in Quantum Anomalous Hall-superconductor Devices [J]. Science, 2020, 367(6473): 64-67.

[32] WANG Zhenyu, RODRIGUEZ J O, JIAO Lin, et al. Evidence for Dispersing 1D Majorana Channels in an Iron-based Superconductor [J]. Science, 367(6473): 104-108.

[33] SERLIN M, TSCHIRHART C L, POLSHYN H, et al. Intrinsic Quantized Anomalous Hall effect in a Moiré Heterostructure [J]. Science, 2020, 367(6480): 900-903.

[34] DENG Yujun, YU Yijun, SHI Mengzhu, et al. Quantum Anomalous Hall Effect in Intrinsic Magnetic Topological Insulator MnBi₂Te₄ [J]. Science, 367(6480): 895-900.

[35] PETERSON C. W., LI Tianhe, BENALCAZAR W A, et al. A Fractional Corner Anomaly Reveals Higher-order Topology [J]. Science, 368(6495): 1114-1118.

[36] SCHRTER N B M, STOLZ S, MANNA K, et al. Observation and Control of Maximal Chern Numbers in a Chiral Topological Semimetal [J]. Science, 2020, 369(6500): 179-183.

[37] NUCKOLLS K P, OH M, WONG D, et al. Strongly Correlated Chern Insulators in Magic-angle Twisted Bilayer Graphene. Nature, 2020, 588, 610-615.

[38] The Franklin Institute Henry C. Kapteyn. [2021-02-02] <https://www.fi.edu/laureates/henry-kapteyn>.

[39] Science. Ultrafast Control of Vortex Microlasers [EB/OL]. (2020-02-28). <https://science.sciencemag.org/content/367/6481/1018>.

[40] ZHANG Zhifeng, QIAO Xingdu, MIDYA B, et al. Tunable Topological Charge Vortex Microlaser [J]. Science, 368(6492): 760-763.

[41] JORDAN I, HUPPERT M, RATTENBACHER D, et al. Attosecond Spectroscopy of Liquid Water [J]. Science, 369(6506): 974-979.

[42] NAKAMURA T, DAVILA-RODRIGUEZ J, LEOPARDI H, et al. Coherent Optical Clock Down-Conversion for Microwave Frequencies with 10-18 Instability [J]. Science, 2020, 368(6493):

889-892.

[43] DPG. Preisträgerinnen und Preisträger —2021 Dr. Benedict Seiferle Ludwig-Maximilians-Universität München [EB/OL]. [2021-02-02] <https://www.dpg-physik.de/auszeichnungen/dpg-preise/gustav-hertz-preis/preistraeger>.

DPG Award winners: 2021 Dr Benedict Seiferle Ludwig-Maximilians-Universität München [2021-02-02] <https://www.dpg-physik.de/auszeichnungen/dpg-preise/gustav-hertz-preis/preistraeger>.

[44] CERN. CERN Experiments Announce First Indications of a Rare Higgs Boson Process [EB/OL]. (2020-08-03) <https://home.cern/news/press-release/physics/cern-experiments-announce-first-indications-rare-higgs-boson-process>.

[45] CERN. LHCb Discovers First “ Open-charm ” Tetraquark [EB/OL]. (2020-08-21). <https://home.cern/news/news/physics/lhcb-discovers-first-open-charm-tetraquark>.

[46] CHISHTI M M R, O'DONNELL D, BATTAGLIA G, et al. Direct Measurement of the Intrinsic Electric Dipole Moment in Pear-shaped Thorium-228 [J]. Nature Physics, 2020, 16: 853-856.

[47] HOFF D E M, ROGERS A M, WANG S M, et al. Mirror-symmetry Violation in Bound Nuclear Ground States [J]. Nature, 2020, 580: 52-55.

[48] MENEGHETTI M, DAVOLI G, BERGAMINI P, et al. An Excess of Small-scale Gravitational Lenses Observed in Galaxy Clusters [J], Science, 2020, 369 (6509): 1347-1351.

[49] Physics World. Ultracold Atomic Comagnetometer Joins the Search for Dark Matter [EB/OL]. (2020-05-05) <https://physicsworld.com/a/ultracold-atomic-comagnetometer-joins-the-search-for-dark-matter/>.

[50] 郑应, 王润娜, 李新, 等. 基于 DAMPE 的暗物质间接探测研究进展 [J]. 大学物理, 2020, 39 (2): 43-46, 61.

ZHENG Ying, WANG Runna, LI Xin, et al. Research Progress of Dark Matter Indirect Detection Based on Damp [J]. University physics, 2020, 39 (2): 43-46, 61.

[51] 环球网百家号. 中国发射天文黑科技卫星 [EB/OL]. (2020-12-11). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685739126016614771&wfr=spider&for=pc>.

HuanQiu Baijiahao. China Launches Astronomical Satellite [EB/OL]. (2020-12-11). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685739126016614771&wfr=spider&for=pc>.

[52] LUONG D X, BETS K V, ALGOZEEB W A, et al. Gram-scale Bottom-up Flash Graphene Synthesis [J]. Nature, 2020, 577 (7792): 647-651.

[53] JOSEPH A A, PARDO-VARGAS A, SEEBERGER P H. Total Synthesis of Polysaccharides by Automated Glycan Assembly [J]. Journal of the American Chemical Society, 2020, 142 (19): 8561-8564.

[54] SRINIVASAN P, SMOLKE C D. Biosynthesis of Medicinal Tropane Alkaloids in Yeast [J]. Nature, 2020, 585: 614-619.

[55] MAHJOUR B, SHEN Yuning, LIU Wenbo, et al. A Map of the Amine-carboxylic Acid Coupling System. Nature [J], 2020, 580: 71-75.

[56] Google AI Quantum and Collaborators, ARUTE F., ARYA K., et al. Hartree-Fock on a

Superconducting Qubit Quantum Computer [J].
Science, 369 (6507) : 1084-1089.

[57] WANG Hongmin, DIAO Yifan, LU Yang, et al.
Energy Storing Bricks for Stationary PEDOT
Supercapacitors [J]. Nature Communications,
2020, 11 : 3882-1-3882-9.

[58] MULLER J B, GEYER P E, COLACO A R, et al.
The Proteome Landscape of the Kingdoms of Life
[J]. Nature, 2020, 582 (7813) : 592-596.

[59] GERI J B, OAKLEY J V, REYES-ROBLES T, et
al. Microenvironment Mapping via Dexter Energy
Transfer on Immune Cells [J]. Science, 367
(6482) : 1091-1097.

[60] BAI Yunxiang, YUE Hongjie, WANG Jin, et al.
Super-durable Ultralong Carbon Nanotubes [J].
Science, 2020, 369 (6507) : 1104-1106.

[61] LIU Lijun, HAN Jie, XU Lin, et al. Aligned,
High-density Semiconducting Carbon Nanotube
Arrays for High-performance Electronics [J] 1
Science, 2020, 368 (6493) : 850-856.

[62] Phy. Org. Scientists Grow Carbon Nanotube Forest
Much Longer Than Any Other [EB/OL] (2020-
11-04). [https://phys.org/news/2020-11-
scientists-carbon-nanotube-forest-longer.html](https://phys.org/news/2020-11-scientists-carbon-nanotube-forest-longer.html).

[63] KOLMER M, STEINER A K, IZYDORCZYK I, et
al. Rational Synthesis of Atomically Precise
Graphene Nanoribbons Directly on Metal Oxide
Surfaces [J]. Science, 2020, 369 (6503) : 571-
573.

[64] STEIMLE B C, FENTON J L, SCHAAL R E.
Rational Construction of a Scalable

Heterostructured Nanorod Megalibrary [J].
Science, 2020, 367 (6476) : 418-424.

[65] SONG Miao, ZHOU Gang, LU Ning, et al.
Oriented Attachment Induces Fivefold Twins by
Forming and Decomposing High-energy Grain
Boundaries [J]. Science, 2020, 367 (6473) : 40-
45.

[66] GONZALEZ-RUBIO G, MOSQUERA J, KUMAR
V, et al. Micelle-directed Chiral Seeded Growth
on Anisotropic Gold Nanocrystals [J]. Science,
2020, 368 (6498) : 1472-1477.

[67] KIM B H, HEO J, KIM S, et al. Critical
Differences in 3D Atomic Structure of Individual
Ligand-protected Nanocrystals in Solution [J].
Science, 2020, 368 (6486) : 60-67.

[68] CUSTER J P, LOW J D, HILL D J, et al.
Ratcheting Quasi-ballistic Electrons in Silicon
Geometric Diodes at Room Temperature [J].
Science, 368 (6487) : 177-180.

[69] EPSTEIN I, ALCARAZ D, HUANG Zhiqin, et al.
Far-field Excitation of Single Graphene Plasmon
Cavities with Ultracompressed Mode Volumes
[J]. Science, 2020, 368 (6496) : 1219-1223.

[70] PENG Kun, JEVTICS D, ZHANG Fanlu, et al.
Three-dimensional Cross-Nanowire Networks
Recover Full Terahertz State [J]. Science, 2020,
368 (6490) : 510-513.

作者贡献说明

刘小平:收集、整理资料,撰写文章初稿;

吕凤先:设计文章框架,修改文章。