



凝聚态物理学科发展态势与发展思路 ——基于国家自然科学基金资助情况(2011–2021)和物理学发展规划的分析与探讨

姜向伟^{1*}, 倪培根^{1*}, 董国轩¹, 谢心澄^{2,3}

1. 国家自然科学基金委员会数学物理科学部, 北京 100083;

2. 国家自然科学基金委员会, 北京 100083;

3. 北京大学物理学院, 北京 100871

*联系人, 姜向伟, E-mail: jiangxw@nsfc.gov.cn; 倪培根, E-mail: nipg@nsfc.gov.cn

收稿日期: 2022-12-22; 接受日期: 2023-01-09; 网络出版日期: 2023-02-10

摘要 凝聚态物理是物理学最大的分支,也是物理学近半个世纪以来发展最为迅速的领域之一.凝聚态物理内涵丰富,基础性、应用性和交叉性强,是信息科学、材料科学、能源科学的重要基础,也是物理学与生命科学、化学科学交叉融合的关键领域,具有重要的战略意义.本文通过回顾2011–2021年我国国家自然科学基金资助布局,与美国科学基金数据对比,并结合物理学科发展规划,分析凝聚态物理学科的发展态势,凝练学科发展方向并提出政策建议,供相关人员参考.

关键词 凝聚态物理, 科学基金, 发展规划, 学科布局, 优先发展领域

PACS: 71.15.-m, 72.25.-b, 73.20.-r, 74.20.-z, 75.20.-b

根据2021–2035年国家中长期科技发展规划基础科学发展战略的总体目标,结合国家自然科学基金工作的特点,2020年国家自然科学基金委员会(以下简称基金委)数学物理科学部着手制订物理学科“十四五”及中长期发展规划,明确学科内涵,分析学科发展规律与发展现状,并提出未来学科的发展目标和优先发展领域.凝聚态物理是该战略规划研究中的重要内容,因其内涵丰富、发展迅速,基础性、应用性和交叉性极强,在学科规划和资助布局中需结合学术界研究现

状、科学基金历史数据和中外对比,综合分析和研判.我们通过回顾2011–2021年我国国家自然科学基金资助布局,与美国科学基金数据进行对比,并结合物理学科发展规划,分析凝聚态物理学科的发展态势,凝练学科发展方向并提出政策建议.

1 学科内涵与战略意义

凝聚态物理研究由大量微观粒子(原子、分子、

引用格式: 姜向伟, 倪培根, 董国轩, 等. 凝聚态物理学科发展态势与发展思路——基于国家自然科学基金资助情况(2011–2021)和物理学发展规划的分析与探讨. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 257001
Jiang X W, Ni P G, Dong G X, et al. Trend analysis and development outlook for condensed matter physics: Discussions based on national natural science fund (2011–2021) and disciplinary development plan of physics (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2023, 53: 257001, doi: [10.1360/SSPMA-2022-0496](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0496)

离子、电子)组成的凝聚体(例如固体、液体、软物质、稠密气体、等离子体以及超流体等特殊量子态)的微观结构、粒子间相互作用和运动规律. 研究对象包括晶体、非晶体、准晶体等固体物质, 还包括液体和软凝聚态物质, 以及活体细胞、生物大分子等生命物质. 通过对这些凝聚态物质的电、磁、声、光、热等物理性质及现象的研究, 掌握其中各种单粒子和集体激发的微观与宏观运动规律, 发现新的物理现象和规律, 丰富物理学的内涵, 使我们对微观物质世界有更深刻的了解. 凝聚态物理是材料科学、信息科学和能源科学的基础, 同时与化学科学和生命科学等学科有密切的交叉与融合, 是国家能源与信息发展战略的科学基础, 也是当前蓬勃发展的量子科学与技术的主要发源领域, 具有重要的战略意义^[1,2].

按照基金委2021年启用的最新学科代码体系^[3], 凝聚态物理学科下设14个领域(如图1(a)所示). 按照研究体系分类, 包括: 半导体体系、铁电与多铁体系、强关联体系、拓扑凝聚态体系、表面界面与低维系统、软凝聚态体系、生命物质体系、准晶与非晶态体系等; 按照物性分类, 包括: 原子结构、电子结构、输运性质、磁性、超导电性等; 此外还包括学科发展的新兴领域以及与其他学科的交叉方向. 以上基本涵盖了凝聚态物理的研究范畴和学科全貌, 也体现了凝聚态

物理与其他学科的逻辑关系. 凝聚态物理起源于量子力学和统计物理在晶态固体中的应用(从而诞生了固体物理), 逐步发展到涵盖更加复杂的凝聚态体系, 其研究以基础前沿性为主. 物理学两种基本的研究范式(还原论和演生论)在凝聚态物理学研究中体现得淋漓尽致. 一方面, 凝聚态物理强调基于量子力学原理从微观原子尺度研究物性起源, 这自然与更加微观的原子分子物理和化学科学有一定程度的交叠; 另一方面, 大量基本粒子的复杂聚集体的行为并不能依据少数粒子的性质做简单外推而得到, 量子多体系统的整体性和凝聚合作效应呈现出的全新性质极大丰富了凝聚态物理学的内涵(所谓“多者异也”^[4]). 从凝聚态物理学科的研究范畴, 可以看出该学科同时具有非常强的应用性和交叉性特征. 例如, 凝聚态物理中的半导体物理、磁学与自旋电子学等研究在信息科学中具有直接的应用, 凝聚态物质的光电特性、光伏特性、热电特性等物性研究广泛应用于能源科学的诸多方面. 凝聚态物理中的理论和计算方法、先进实验观测与表征技术等, 在化学科学、生命科学中具有广泛的应用, 并与这两个学科交叉融合, 诞生了如物理化学、生物物理等交叉研究领域. 此外, 对凝聚态体系(特别是固态系统)中量子态的产生、探测与操控研究构成量子计算、量子通讯、量子精密测量等应用的关键基础. 综

(a) 凝聚态物理学科的代码体系(基金委)

A20 凝聚态物理
A2001凝聚态物质结构、相变和晶格动力学
A2002凝聚态物质热光电性质
A2003凝聚态物质输运性质
A2004凝聚态物质电子结构
A2005半导体基础物理
A2006铁电与多铁体系
A2007磁学及自旋电子学
A2008超导与超流
A2009强关联体系
A2010拓扑凝聚态体系
A2011表面界面与低维物理
A2012液态、准晶与非晶态物理
A2013软凝聚态与生物物理
A2014凝聚态物理新兴与交叉领域

(b) 凝聚态物理学科的战略地位

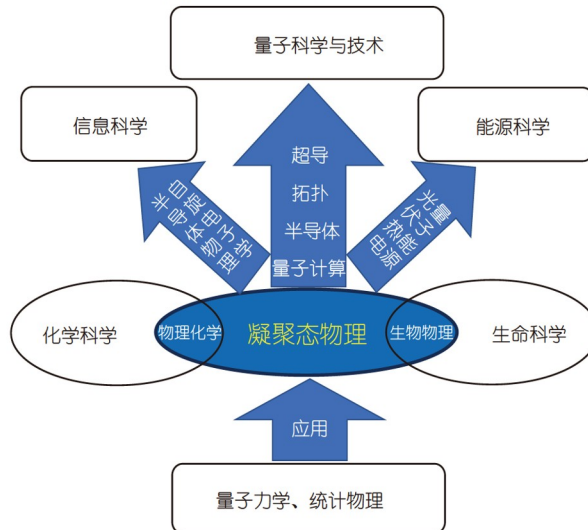


图1 (网络版彩图)凝聚态物理学科的研究范畴与战略地位. (a) 凝聚态物理学科的代码体系; (b) 凝聚态物理学科的战略地位
Figure 1 (Color online) The research scope and strategic role of condensed matter physics. (a) The NSFC application code of condensed matter physics; (b) the strategic role of condensed matter physics.

上所述, 凝聚态物理研究兼具基础性、前沿性、应用性和交叉性, 在物理学科乃至整个自然科学研究体系中具有重要的战略地位(如图1(b)所示).

2 国家自然科学基金资助布局情况分析

2.1 国家自然科学基金2011–2021年资助凝聚态物理研究概况

基金委数学物理科学部2011–2021年间, 在凝聚态物理领域资助科学基金项目5547项, 资助经费45.19亿元人民币. 其中包括面上项目2322项、青年科学基金项目2325项、重点项目93项、优秀青年科学基金项目60项(含港澳)、国家杰出青年科学基金项目34项、创新研究群体项目8项、重大项目6项、国家重大科研仪器研制项目30项(其中部门推荐类10项, 自由申请类20项)、科学中心项目2项. 此外, 国家自然科学基金在凝聚态物理领域还布局实施了“单量子态的探测及相互作用”“第二代量子体系的构筑与操控”两个重大研究计划. 需要说明的是, 由于基金委自2021年启用新的申请代码体系, 同时对申请和批准项目的历史数据进行了相应的归并和迁移, 以上对于凝聚态物理科学基金项目的统计包括A20及下属代码(合计5432项), 2021年之前的项目还包括迁移后A24下的凝聚态物理项目和二级代码A2404项目(原A040212“量子计算中的凝聚态物理问题”迁移至A2404“量子计算与量子通信”), 以

下分析中以A20及下属代码项目为主.

表1列出了2011–2021年凝聚态物理学科(A20及下属代码)青年科学基金、面上项目、重点项目、优秀青年科学基金和国家杰出青年科学基金的申请与资助情况.

(1) 面上项目与青年科学基金

面上项目和青年科学基金项目量大面广, 具有鼓励自主创新、促进学科发展、培育后备人才的重要作用, 是国家自然科学基金的根本. 2011–2021年, 国家自然科学基金资助凝聚态物理学科(A20及下属代码)面上项目2271项(资助经费15.8219亿元)、青年科学基金项目2298项(资助经费5.84505亿元).

基金委于2021年全面启用新的申请代码体系, 同时对既往申请与资助的科学基金项目进行了代码迁移, 在此过程中存在一些新旧代码项目归属的不确定性, 因此本文没有按照申请代码来划分2011–2021年科学基金项目的领域, 而着重于关键词和研究方向的分析, 我们认为这样可以更加准确地反映基金项目的领域属性. 在图2中, 我们针对4569项面上项目和青年科学基金项目, 遴选了43个具有代表性的关键词, 进行了项目申请和资助情况的统计. 对于关键词的选择, 需要说明的是, 第一, 这些关键词是基于经验选取, 而非经过全面系统的筛选, 虽然基本涵盖凝聚态物理学科的各个研究领域, 但仍难顾全所有的研究方向; 第二, 关键词属性和粗细粒度难以做到均一, 有些是不同研

表1 凝聚态物理学科(A20及下属代码)2011–2021年申请与批准项目数按项目类型统计

Table 1 Applied and approved research programs in condensed matter physics (under application code A20) during 2011–2021, categorized by program types

年度	青年科学基金		面上项目		重点项目		优秀青年科学基金		国家杰出青年科学基金	
	申请	批准	申请	批准	申请	批准	申请	批准	申请	批准
2011	584	191	632	187	27	5	–	–	35	2
2012	624	197	761	199	35	8	51	6	31	4
2013	634	212	661	196	24	8	36	4	25	3
2014	651	209	595	185	38	8	41	5	22	1
2015	709	226	690	211	49	8	44	5	22	2
2016	653	194	728	208	34	10	55	4	31	3
2017	689	204	745	213	23	5	49	5	35	2
2018	700	202	815	213	33	11	55	5	40	3
2019	777	203	896	225	32	9	71	7	36	4
2020	879	216	1001	220	37	10	74	7	55	3
2021	923	244	949	214	27	9	72	9	49	5

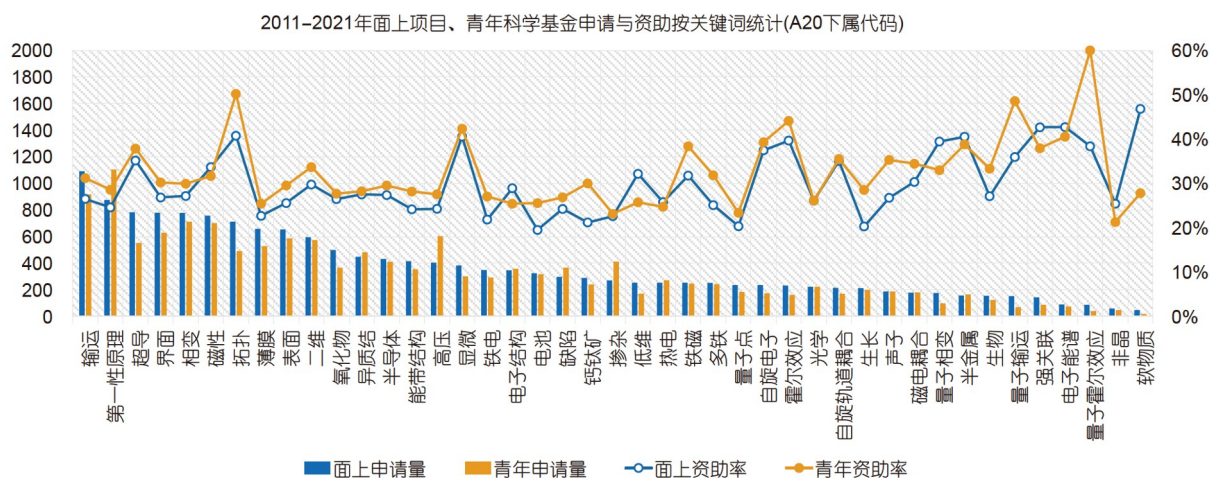


图2 (网络版彩图)凝聚态物理学科2011–2021年科学基金面上项目、青年科学基金项目申请与资助按关键词频次统计
Figure 2 (Color online) Key word statistics of applied and approved General Programs and Young Scientists Funds in condensed matter physics during 2011–2021.

研究领域共性的物性研究,有些属于不同研究体系普遍采用的研究方法,有些则是研究体系对象本身,且部分关键词之间存在一定的隶属关系;第三,每个项目可以选择多个相关的关键词,项目与关键词之间不是一一对应关系,因而不同关键词下的项目统计可能有重复,即一个项目可能同时属不同(但相关)的多个研究领域,我们认为这不影响对研究领域分布的分析。此外,申请量太小的关键词没有计入统计,由此得到的分析结果做不到全面系统,希望以点带面地反映凝聚态物理学科重要领域的基本情况。

我们按照面上项目申请中以上43个关键词的出现频次进行了排序,青年科学基金项目按照关键词的统计结果跟面上项目的趋势基本相符。频次较高的关键词包括: 输运、第一性原理、超导、界面、相变、磁性、拓扑、薄膜、表面、二维、氧化物、异质结、半导体、能带结构、高压等,这些关键词分布在凝聚态物理多个申请代码。关键词“输运”和“第一性原理”在面上项目和青年科学基金项目申请中的出现频次明显高于其他关键词,这是由于这两个关键词属于凝聚态物理学科多数研究领域共性的物性研究和研究方法,计算模拟已经成为凝聚态物理重要的研究范式。与面上项目相比,青年科学基金差异较大的关键词有: 第一性原理、超导、拓扑、高压、掺杂等。其中关键词“第一性原理”和“高压”在青年科学基金项目申请中的出现频次明显高于面上项目,我们认为这是由于凝聚

态体系的第一性原理计算更容易被年轻人掌握作为研究起点,而“高压”关键词的特征则反映了这一领域正在培育更多的年轻人从事该领域研究。虽然2021年以前凝聚态物理学科申请代码不曾包含“半导体物理”,但我们看到关键词“半导体”及其相关的“缺陷”“掺杂”出现频次较多,反映出半导体基础物理研究是凝聚态物理学科不可或缺的重要领域。同样,关键词“拓扑”频次处于上述43个关键词的第7位,表明拓扑凝聚态体系已经发展成为凝聚态物理学科一个重要的新兴领域。同时,关键词“软物质”和“非晶”频次非常少,软凝聚态物理和非晶态物理是凝聚态物理中交叉性比较强的研究领域,统计数据显示出这两个领域处于萎缩的状态,在今后的学科布局中需要加强扶持。2011–2021年,自然科学基金在凝聚态物理学科的面上项目平均资助率为26.80%,青年科学基金平均资助率为29.37%,从资助率来看,以上关键词中面上项目资助率较高(超过35%,下同)且频次超过100的包括: 电子能谱、强关联、拓扑、显微、半金属、霍尔效应、量子相变、自旋电子、量子输运、超导、自旋轨道耦合(按频次排序,下同),青年科学基金项目资助率较高且频次超过100的包括: 拓扑、霍尔效应、显微、自旋电子、半金属、铁磁、超导、自旋轨道耦合、声子,可见这些关键词领域的项目申请在同类研究中处于较高水平。

(2) 重点项目

国家自然科学基金重点项目支持从事基础研究的

科学技术人员针对已有较好基础的研究方向或学科生长点开展深入、系统的创新性研究, 促进学科发展, 推动若干重要领域或科学前沿取得突破. 2011–2021年, 国家自然科学基金重点项目在凝聚态物理学科布局的领域包括: 固态量子计算、受限量子体系、强关联体系、量子自旋液体、超导物理、拓扑物态、功能材料与器件物理、表面界面与低维体系、半导体基础物理、软物质与生物物理、固态磁性或多场调控、计算方法和软件、基础能源物理、极端条件凝聚态物理. 在以上14个领域资助重点项目94项, 资助经费3.0182亿元人民币. 从近三年凝聚态物理学科申请与资助重点项目按指南领域分布情况来看, 凝聚态物理学科重点项目申请与资助基本保持稳定, 各个领域方向也基本均衡.

重点项目强调指南引导下自由选题, 需综合研判学科发展现状和趋势, 对已有较好基础的领域方向进行布局. 鉴于学科特点, 凝聚态物理重点项目布局着重面向科学前沿, 同时密切结合国家需求. 纵览科学基金重点项目历年项目指南和申请与资助情况, 可窥见凝聚态物理学科重点项目近十年来发展布局特点如下: 第一, 以基础前沿主导学科发展, 凝聚态物理学科的基础性和前沿性决定了其资助布局以前瞻性基础研究为主, 受限量子体系、强关联系统、超导物理、拓

扑物态是凝聚态物理中基础性最强的领域, 对其稳定长期支持是实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破的前提; 第二, 以物理创新引领技术突破, 凝聚态物理是应用性极强的物理学分支, 是众多关键技术问题的基础, 半导体基础物理是破解芯片“卡脖子”难题的钥匙, 基础能源物理是克服能源短缺、实现清洁能源的利剑, 固态量子计算是未来量子科学技术的核心; 第三, 以交叉融合拓展学科前沿, 当前科研范式深刻变革, 交叉融合成为科学技术发展潮流, 计算凝聚态物理和生命物理学在凝聚态物理学与数学、信息科学、生命科学的进一步深度交叉中得到蓬勃发展, 成为新的学科前沿.

国家自然科学基金自2019年开始实行按科学问题属性分类申请和评审^[5], 即将科学基金项目按科学问题属性分为四类: A 鼓励探索、突出原创, B 聚焦前沿、独辟蹊径, C 需求牵引、突破瓶颈, D 共性导向、交叉融通, 以下我们将这四类科学问题属性分别简称为: “原创”“前沿”“需求”“交叉”. 图3给出了2019–2021三年来凝聚态物理学科青年科学基金、面上项目、重点项目申请和资助情况按照四类科学问题属性的统计对比, 从中可以看出重点项目与青年科学基金和面上项目相比具有很大不同. 首先, 重点项目四类科学问题属性的项目申请占比更加均衡, 这是重点项

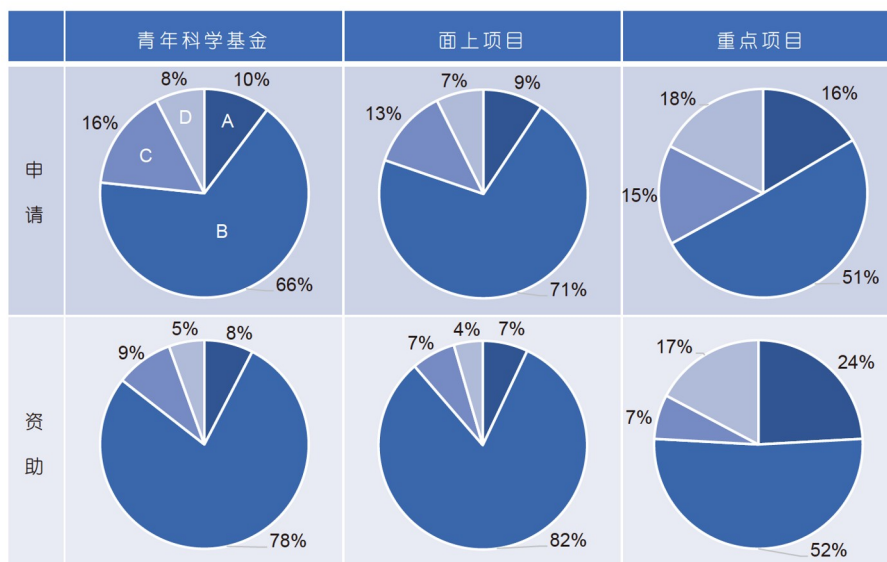


图3 (网络版彩图)凝聚态物理学科(A20下属代码)青年、面上、重点项目申请和资助情况按科学问题属性分类统计(2019–2021)

Figure 3 (Color online) Statistics on attributes of scientific problems for the applied and approved Young Scientists Funds, General Programs and Key Programs in condensed matter physics (under application code A20) during 2019–2021.

目指南对不同属性研究内容均衡布局的结果;其次,原创类重点项目的申请占比和资助率更高,这反映了凝聚态物理研究领域在重点项目层面更加注重和鼓励原始创新.

(3) 优秀青年科学基金、国家杰出青年科学基金、创新研究群体

优秀青年科学基金项目支持在基础研究方面已取得较好成绩的青年学者自主选择研究方向开展创新研究,促进青年科学技术人才的快速成长,培养一批有望进入世界科技前沿的优秀青年骨干;国家杰出青年科学基金项目支持在基础研究方面已取得突出成绩的青年学者自主选择研究方向开展创新研究,促进青年科学技术人才的成长,吸引海外人才,培养和造就一批进入世界科技前沿的优秀学术带头人;创新研究群体项目支持国内外优秀学术带头人自主选择研究方向、自主组建和带领研究团队开展创新性的基础研究,攻坚克难,培养和造就在国际科学前沿占有一席之地的研究团队.2011–2021年,国家自然科学基金资助凝聚态物理学科优秀青年科学基金项目60项、国家杰出青年科学基金项目34项、创新研究群体7个.

图4给出2011年以来凝聚态物理学科获资助优秀青年科学基金和国家杰出青年科学基金项目(以下分别简称“优青”和“杰青”)按研究领域统计分布情况.从

中可以看出近十年来凝聚态物理学科不同研究领域人才队伍成长分布情况,2011–2021年期间获优青项目和杰青项目资助均较多的研究领域包括拓扑凝聚态体系、强关联体系和低维系统,反映了这三个研究领域近十年来发展势头迅猛,并培养了一支强大的青年人才队伍.另外我们看到超导物理领域虽然近十年来培养了较多优青人才,但在杰青层次却明显缺失,这与2001–2010年期间的情况差异迥然,这从侧面反映了当前超导领域的研究状况,即作为凝聚态物理学科的一个传统研究领域,超导物理研究已经进入一个攻坚克难的瓶颈期,需要进一步组织力量突破超导本质、高温超导机理和先进超导材料等系列根本性问题,鼓励原创性的新路径探索.此外,以低温物理和半导体物理为代表的研究领域与国家需求密切相关,这两个领域的研究突破需长时间积累和攻关,研究成果的积累相对缓慢,因此在优青和杰青人才队伍体系中占比很小,我们在今后的布局中能够调整人才评价机制,鼓励“十年磨一剑”的基础研究,为国家储备更多破解“卡脖子”难题的青年人才.从研究范式上来看,2011–2021年获得资助的国家杰出青年科学基金项目中有13项实验研究、14项计算模拟研究和7项纯理论研究,表明计算模拟已经成为凝聚态物理研究中一种重要的研究范式,理论概念突破-电子结构计算-高质

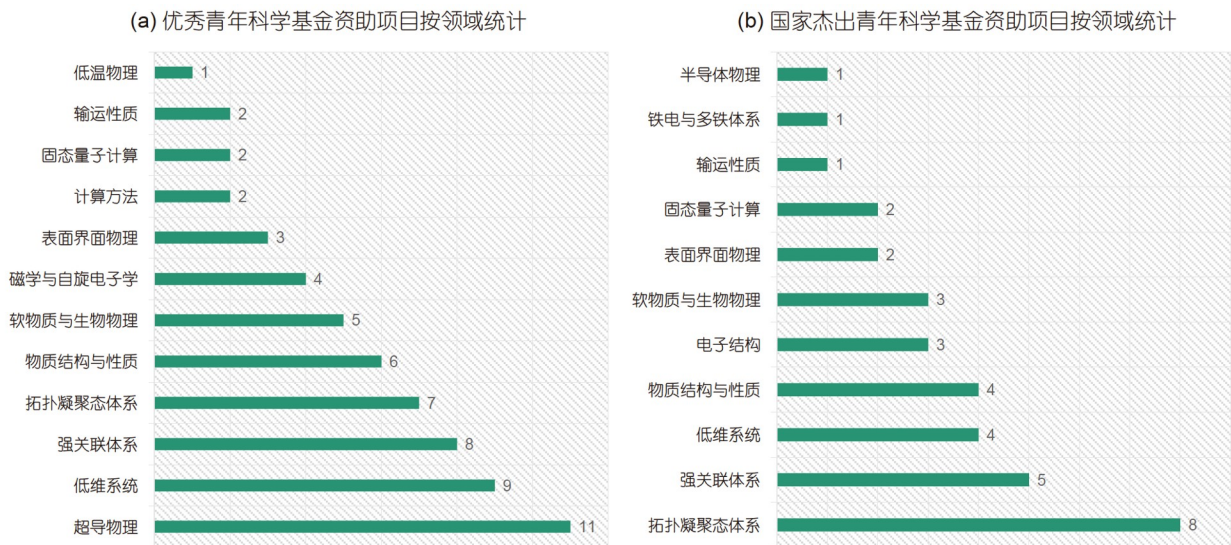


图4 (网络版彩图)凝聚态物理学科2011–2021年优秀青年科学基金(a)、国家杰出青年科学基金(b)获资助项目按研究领域统计

Figure 4 (Color online) Statistics on research areas for the approved Excellent Young Scientists Funds (a) and National Science Funds for Distinguished Young Scholars (b) in condensed matter physics during 2011–2021.

量材料制备-先进实验表征在量子反常霍尔效应的实验发现和拓扑物性研究中表现尤为突出, 理论模型突破和先进计算方法是先导, 先进实验技术是关键, 但人才体系中真正提出新理论、攻坚计算方法和磨砺实验技术的尚不多见, 还需加强引导.

2011–2021年, 国家自然科学基金资助凝聚态物理学科创新研究群体项目7项, 包括: “低维体系中的新奇量子现象”“凝聚态物质中新奇量子现象的计算和理论研究”“聚集体的经典和量子统计物理的前沿问题研究”“复杂表面与界面体系的新物理”“新型量子材料物理和器件”“低维拓扑体系量子输运”“极端条件新物态和量子演生现象”, 资助总经费7250万元人民币.

(4) 国家重大科研仪器研制项目

国家重大科研仪器研制项目面向科学前沿和国家需求, 以科学目标为导向, 资助对促进科学发展、探索自然规律和开拓研究领域具有重要作用的原创性科研仪器与核心部件的研制, 以提升我国的原始创新能力. 国家重大科研仪器研制项目包括部门推荐和自由申请两个亚类. 2011–2021年, 国家自然科学基金资助凝聚态物理学科(A20及A24下属代码)国家重大科研仪器研制项目30项, 其中包括部门推荐10项、自由申请20项, 资助总经费8.66亿元人民币.

“部门推荐”国家重大科研仪器研制项目包括“拓扑量子计算超低温实验仪器研制”“多波段脉冲单自旋核磁共振谱仪研制”“多通道超导单光子探测器”“基于上海同步辐射光源的能源环境新材料原位电子结构综合研究平台(SiP-ME2)研制”“极端条件超高精度实空间/动量空间原位谱仪”“新一代大型超高压产生装置”“针对若干国家战略需求材料服役条件下性能与显微结构间关系的原位研究系统”“电子自旋和自旋极化电流的时空演化成像系统”“低维量子物质非平衡物理性质原位综合实验研究平台的研制”“宽禁带半导体点缺陷的单体光电特性表征仪器系统”, 其中7项已经通过结题验收. “自由申请”国家重大科研仪器研制项目涵盖量子材料制备与表征系统、先进电子显微系统、极端条件下的物性测量系统、先进光电子谱仪、不同波段的探测和显微系统、自旋极化电流和自旋流测试系统等.

凝聚态物理科研仪器研制具有前沿性强、指标高、难度大等特点, 研制指标纯粹, 实现条件苛刻, 往往代表了逼近物理极限的探测能力. 国家自然科学基金

金在凝聚态物理学科资助的上述科研仪器研制项目, 绝大多数得到顺利实施, 取得了突出的研制进展和研究成果, 以下仅就“部门推荐”的国家重大科研仪器研制项目, 举数例以说明.

“多波段脉冲单自旋核磁共振谱仪研制”项目, 基于单电子自旋量子干涉原理, 将微弱的单核自旋信息转化为单电子自旋量子干涉仪的相位信息, 并通过精确的量子调控实现探测, 在多波段复合磁共振系统、钻石量子探针制备、操控与读出系统集成化、多波段微波射频系统等关键技术方面取得突破, 研制成功国际首台具备单核自旋探测灵敏度的多波段脉冲单自旋核磁共振谱仪, 实现了单核自旋量子态的探测, 为生命、信息、物理、化学、材料等学科开展前沿研究提供了开放的实验研究平台和技术支撑, 促进了固态量子计算和量子精密测量等前沿领域的发展.

“针对若干国家战略需求材料服役条件下性能与显微结构间关系的原位研究系统”项目, 基于透射电子显微镜的原子分辨率和扫描电子显微镜的纳米分辨率, 研制成功国际领先水平的原位纳米/原子尺度力热耦合研究系统, 实现了在苛刻条件下材料性能与结构关系的原位、动态的跨尺度研究, 能够在1150°C高温与137 MPa量级应力耦合场同时施加条件下, 原位开展材料力学性能与原子/纳米尺度材料显微结构间关系的研究, 并成功应用于我国“卡脖子”难题的镍基单晶高温合金等关键材料研究.

“基于上海同步辐射光源的能源环境新材料原位电子结构综合研究平台(SiP-ME2)研制”研制成功弯铁软X光光束线等8个研制单元, 原位高分辨电子结构表征线站成为世界首个集成同步辐射X光、深紫外激光、亚飞秒激光脉冲三种先进光源和分子束外延、脉冲激光沉积等先进原位材料生长技术的高精度角分辨光电子能谱研究平台, 原位近常压软X光谱学线站成为国内能量范围最宽、光子通量最高的软X射线谱学线站.

“电子自旋和自旋极化电流的时空演化成像系统”项目, 研发了具有自主知识产权的无液氦消耗强磁场、1.2 K极低温扫描隧道显微技术, 成功实现了原子级空间分辨和百飞秒超快事件分辨的自旋成像, 在音叉式磁交换力显微术、器件电流运行下的自旋极化测量等方面取得突破. 该系统的成功研发不仅摆脱了低温精密仪器长期以来对不可再生资源液氦的依赖, 而

且在自旋表征领域实现了国际领先,有效支撑了我国在自旋电子学、自旋量子计算、自旋纳米光学等领域的研究。

“低维量子物质非平衡物理性质原位综合实验研究平台的研制”项目,发展了超高真空极低温强磁场原位输运测量技术、超高真空低温原位局域电势测量技术、低温原位微波阻抗显微镜、原位微区赫尔时间分辨角分辨光电子能谱技术,成功研制集这些技术于一体的综合实验平台,结合了实空间、动量空间、时间域内的不同探测手段,实现了在超高真空环境下进行量子材料的原位生长和多自由度精密探测,可开展量子态的定向构筑和精密测量,将在量子科学研究中发挥重要的推动作用。

但也有个别项目研制进展不顺利。我们分析其原因:(1)由于国际形势的变化,导致部分研制单元模块受阻;(2)由于研究团队配备不齐,缺乏持续稳定的攻关团队;(3)立项时对研制指标的评估不足,或由于物理学家追求物理极限的心态,提出了偏高的研制指标,造成研制困难。我们建议科研仪器研制项目要注重核心模块的自主研发,依托单位需做好保障,保证仪器研制过程中研究团队的稳定性,立项评估更加谨慎地制定科学合理的研制指标,仍然鼓励物理学家秉持“十年磨一剑”的钻研精神,研制极限性能的科研仪器。另外,近年来凝聚态物理学科的科研仪器研制项目申请有所下降,我们鼓励更多科研人员申请仪器研制项目,为国家科研硬实力的提升贡献力量。

(5) 重大项目

重大项目面向科学前沿和国家经济、社会、科技发展及国家安全的重大需求中的重大科学问题,超前部署,开展多学科交叉研究和综合性研究,充分发挥支撑与引领作用,提升我国基础研究源头创新能力。2011–2021年,国家自然科学基金资助凝聚态物理学科(A20及A24下属代码)重大项目6项,资助总经费1.13亿元人民币。这6项重大项目包括由中国科学技术大学、中国科学院物理研究所、浙江大学和中国人民大学共同承担的“新型非常规超导材料的探索和机理研究”,由中国科学院物理研究所、北京大学、中国科学院上海应用物理研究所共同承担的“水科学若干关键基础问题研究”,由复旦大学、上海交通大学、清华大学共同承担的“准二维体系中的高温超导态和拓扑超导态的探索”,由南京大学、同济大学、武汉大学共同

承担的“微结构材料中声子的调控及其在超导量子芯片中的应用”,由北京计算科学研究中心、复旦大学和中国科学院上海技术物理研究所共同承担的“微纳器件中非平衡物理过程研究”,以及由北京大学、中国科学院物理研究所、南京大学共同承担的“生命系统中的非平衡统计物理和动力学研究”。

(6) 科学中心项目

基础科学中心项目旨在集中和整合国内优势科研资源,瞄准国际科学前沿,超前部署,充分发挥科学基金制度的优势和特色,依靠高水平学术带头人,吸引和凝聚不同领域和不同学科方向的优秀科技人才,着力推动学科深度交叉融合,相对长期稳定地支持科研人员潜心研究和探索,致力科学前沿突破,产出一批国际领先水平的原创成果,抢占国际科学发展的制高点,形成若干具有重要国际影响力的学术高地。2011–2021年,国家自然科学基金资助凝聚态物理学科(A20及A24下属代码)科学中心项目3项,资助总经费3.075亿元人民币。这3项科学中心项目包括由北京大学、中国科学院物理研究所和中国科学技术大学共同承担的“高温超导材料与机理研究”,由中国工程物理研究院研究生院和北京计算科学中心共同承担的“基础能源物理的科学问题”,由复旦大学、中国科学院物理研究所和南京大学共同承担的“面向材料功能应用的新一代计算方法与软件”。

(7) 重大研究计划

重大研究计划围绕国家重大战略需求和重大科学前沿,加强顶层设计,凝练科学目标,凝聚优势力量,形成具有相对统一目标或方向的项目集群,促进学科交叉与融合,培养创新人才和团队,提升我国基础研究的原始创新能力,为国民经济、社会发展和国家安全提供科学支撑。重大研究计划应当遵循有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展的基本原则。2011–2021年期间,国家自然科学基金以凝聚态物理学科为主布局和实施了两个重大研究计划:“单量子态的探测及相互作用”和“第二代量子体系的构筑和操控”。其中“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划于2009年启动,2010年开始实施,实施周期八年,该重大研究计划已于2017年实施结束,资助总经费2亿元人民币;“第二代量子体系的构筑和操控”重大研究计划于2020年启动,2021年开始实施,实施周期八年,拟资助总经费2亿元人民币。这两个重大研究计划主要面向凝聚态

物理学科基础前沿, 在量子科技领域进行了战略布局.

单量子态研究是凝聚态物理、原子分子物理及光物理等学科中极具挑战性的前沿领域. 单量子态主要研究对象包括单个电子态、单个原子态、单个分子的振动态/转动态、单个光子态、超导宏观量子效应和原子的玻色-爱因斯坦凝聚体等. 研究对象的广泛性意味着单量子态研究具有很大难度和挑战性. 实验上要求仪器具有极高的能量分辨率、动量分辨率、时间分辨率、空间分辨率等, 理论上要求模型更准确、更普适, 计算方法更精致、更有效. 为了把单量子态测量得更精准, 并消除热涨落的影响, 必须要把体系降到极低温. 对单量子态的响应, 往往信号很弱, 要把它们放大到一般仪器能够探测的灵敏度, 往往需要加载很严苛的调控外场, 如强磁场. 研究单量子态的动态过程, 需要飞秒甚至高达阿秒的时间分辨. 单量子态研究所需的极端实验技术几乎代表了探测和调控自然界的最高能力.

“单量子态的探测及相互作用”重大研究计划围绕新技术新方法的发展、新现象新机理的发现、单量子态的纯化与构筑开展了深入的研究工作, 实现了以下总体科学目标^[6]: (1) 开拓发展了新的精密测量方法和手段, 通过对单量子态的精密检测, 进一步检验和丰富了量子力学的基本问题, 从微观本质上加深了对物理、化学、信息、材料等领域中的基本量子现象和机理的深入理解. 通过对不同单量子态及其相互作用的研究, 发现了若干新奇量子效应, 为信息处理和能源环境等领域中重大新技术的应用奠定了物理基础, 为国民经济的跨越式可持续发展和国家安全提供了基础性和前瞻性的科学技术储备. (2) 通过对单量子态及其相互作用的精密测量和理论研究, 提出了有原创性的学术思想, 形成了一些新概念、新方法和新技术, 有望在未来引领我国在信息、材料、环境和能源等领域的重大技术发展. 逐步形成了具有国际影响的学派, 造就了一支高水平、结构合理的研究队伍, 提升了我国在国际上的科学竞争力和学术地位. (3) 通过该重大研究计划的实施, 解决了国家在若干精密实验技术方面的急需, 部分解决了某些关键技术依赖于进口的局面, 培养了一批精于实验科学的优秀青年学者. 该重大研究计划的实施在单量子态探测及相互作用的关

键基础科学问题方面取得了一批有国际影响的研究成果, 实现了包括铁基高温超导和量子反常霍尔效应等重大科学突破, 发展了国际先进的精密测量方法和技术, 使我国在单量子态研究方面整体走在国际前列. 该计划凝聚了相关领域的科研人才, 培养和造就了一批核心骨干和优秀学术团队, 这为我国今后在量子科技革命的竞争中奠定了人才基础.

第二代量子体系是基于量子力学基本原理, 能够展现纠缠态、叠加态等量子态被测量和操控的物理体系^[7]. 建立在第二代量子体系基础上的未来信息技术, 包括量子计算、量子通信、量子传感等, 直接操控和测量量子态, 利用量子纠缠和量子叠加态进行信息处理. 如半导体量子计算直接操控电子的自旋量子态, 基于多个电子自旋的纠缠实现运算. 量子信息科学会导致下一次技术革命已经成为很多国家的共识, 美国、英国、日本、欧盟等国家和地区均把量子科技列为重点发展领域. 美国提出重组科学基金会的草案, 计划五年投入1000亿美元, 重点资助量子计算和量子信息系统等十大领域. 欧盟委员会《量子宣言(草案)》描述的路线图中提出重点发展通用量子计算机、广域量子通信, 其基础和核心正是第二代量子体系. 第二代量子体系是实现量子计算的物理系统, 像目前以电子计算机为核心的信息技术一样, 固态量子计算机是世界各国重点部署的领域. 而由超导/拓扑/半导体/磁性等凝聚态物理重点关注的材料构筑的第二代量子体系正是构成固态量子计算机的硬件以及其他量子信息技术的基础. 四种典型的第二代量子体系包括超导约瑟夫森结、半导体量子点、拓扑马约拉纳(Majorana)态和晶体色心自旋态, 它们对应于超导量子计算、半导体量子计算、拓扑量子计算、色心量子计算四种固态量子计算. 第二代量子体系的构筑和操控是当前基础科学的最前沿研究领域之一, 是抢占量子信息科技战略制高点的基础, 是我国实现超越和引领的关键领域之一.

国家自然科学基金布局和实施“第二代量子体系的构筑和操控”重大研究计划^[1], 该计划的核心科学问题和主要研究内容包括: (1) 关键量子功能材料的可控制备与量子体系的精准构筑. 具体研究内容包括液氮温区无能耗拓扑边缘态材料制备、能够展示马约拉

1) 参阅国家自然科学基金“第二代量子体系的构筑与操控”重大研究计划实施规划书.

纳零能模或其他非阿贝尔任意子的各种高质量异质结等材料制备、基于各类量子态的量子比特构筑等; (2) 量子态精密测量与操控实验技术及理论方法. 具体研究内容包括逼近量子极限的单量子态测量技术与方法、量子态的纠缠和量子门的操控技术与方案、量子计算机纠错的理论方法和量子算法研究、先进制冷和极低温量子调控测量技术的自主研发和集成等; (3) 面向超导等固态量子计算的研究. 具体研究内容包括长相干时间、高转变温度的超导材料、低损耗的介质和约瑟夫森结构筑, 量子门操控的保真度提高, 量子比特的集成等; (4) 新型量子计算体系和实现方案探索. 具体研究内容包括马约拉纳零能模非阿贝尔性质的确定性证明、拓扑量子比特的物理实现等. 该计划的科学目标包括: (1) 探索和制备可用于量子计算和量子探测的高质量材料, 实现量子态精准构筑, 探索新型量子体系, 抢占国际制高点; (2) 发展量子态测量和操控技术, 提升探测和调控精度, 探索新的技术方法, 解决卡脖子技术问题; (3) 针对可纠错固态量子计算、高温超导机理、拓扑量子体系和低维量子体系开展前瞻性研究, 在若干方向取得重大科学突破.

(8) 科学基金资助成果

在科学基金项目资助下, 我国科学家近十年来在拓扑物态、高温超导和能源物理等方面取得了一系列国际一流的研究成果. 廖举数例以观其一斑: “拓扑绝缘体薄膜与异质结制备及表面拓扑电子态研究”首次从实验上观测到量子反常霍尔效应^[8], 该实验发现被2016年诺贝尔物理学奖评奖委员会和获得者霍尔丹列为拓扑物质领域近二十年来最重要的实验发现之一; “拓扑半金属材料物性的理论研究”发现了拓扑半金属对数周期振荡与离散标度不变性, 预言了三维量子霍尔效应的新机制^[9], 并得到实验证实^[10]; “FeSe基超导单晶与薄膜的物理/化学调控及机理研究”发现了铁硒基高温超导体中清晰的马约拉纳零能模^[11], 为探索拓扑量子计算迈出了重要一步; “人造拓扑超导体与Majorana费米子的研究”利用极低温强磁场扫描隧道显微镜在拓扑绝缘体/超导体异质结中分段费米面的探测方面取得重要进展, 首次在实验上观察到50多年前理论预言的分段费米面^[12]; “二维黑磷晶体的场效应和量子行为及其压力效应的研究”以直接的实验证据揭示了二维极限下的单层铜基超导体具有和块体铜基超导体相同的超导特性^[13], 推动了对高温超导现象的深入理

解; “高温超导材料与机理研究”发展出连续组分单晶薄膜技术, 制备出具有单晶结构、连续化学组分的高温超导(La,Ce)₂CuO₄组合薄膜, 结合跨尺度结构和输运表征技术, 首次揭示高温超导体体系正常态的奇异金属线性电阻斜率与超导转变温度之间的量化规律, 发现非常规超导与奇异金属态具有共同驱动机制^[14]; “新型钙钛矿/硅异质结两端叠层太阳能电池物理与器件研究”设计制备了具有稳固异质结结构的钙钛矿太阳能电池, 通过在表面富铅钙钛矿薄膜上沉积氯化氧化石墨烯层, 抑制了层-层离子移动对异质结结构和光电性能的破坏, 有效提高了电池耐久性^[15].

表2给出了2012–2020年度凝聚态物理学科自然科学基金结题项目发表论文与人才培养统计情况, 可以看出这十年间凝聚态物理科学基金项目发表论文与培养人才数量均发生了大幅增长. 表3给出了发表高端论文的详细统计情况, 我国学者近年来在《自然》(*Nature*)、《科学》(*Science*)等期刊发表的高水平学术论文数量呈现倍数增长. 此外, 中国学者对本土期刊的认同感逐年增强, 在国家自然科学基金资助的凝聚态物理项目中, 结题成果发表在《国家科学评论》(*National Science Review*), 《科学通报》(*Science Bulletin*), 《中国科学: 物理学 力学 天文学》(*Science China Physics, Mechanics & Astronomy*)等期刊的学术论文数量增长尤为迅速.

综上所述, 我国科学基金近十余年来在凝聚态物理学科研究领域进行了卓有成效的资助. 面上类项目较为均衡地资助了各个领域和研究方向的自由探索, 保证了学科的均衡、协调和可持续发展; 重点项目针对凝聚态物理学科优势方向进行了指南引导性的资助布局, 有效推动了学科研究前沿的发展; 在重大项目层面, 集中部署了超导物理、水科学、微纳器件物理、生物物理等重大科学前沿以及国家战略需求和多学科交叉融合研究, 提升了我国凝聚态物理学科基础研究的源头创新能力; 形成了高温超导物理、基础能源物理、计算凝聚物理三个基础科学中心, 有望推动这三个重要基础领域取得新的突破; 重大研究计划则围绕“量子科技”这一国家重大战略需求和重大科学前沿, 顶层设计和布局了面向未来量子技术的前瞻性基础研究, 取得了若干重大突破, 有望引领未来国际量子科学与技术研究竞争; 而在重大科研仪器研制方面, 凝聚态物理是国家自然科学基金资助重大科研仪器研制项目

表2 凝聚态物理学科2012–2020年结题项目发表论文与人才培养情况统计表

Table 2 Statistics on the publications and educated students from the concluded research programs in condensed matter physics during 2012–2020

结题年度	SCI论文总数	EI论文总数	出站博士后	培养博士生	培养硕士生
2012	2976	329	36	428	473
2013	4538	612	68	554	608
2014	2478	337	24	235	251
2015	5195	567	73	569	732
2016	6198	533	38	408	562
2017	5519	112	65	411	485
2018	5536	90	55	441	562
2019	5337	65	62	405	492
2020	5696	71	79	510	575

表3 凝聚态物理学科2012–2020年结题项目发表高端论文统计表

Table 3 Statistics on the high-level publications from the concluded research programs in condensed matter physics during 2012–2020

结题年度	<i>Nature</i>	<i>Science</i>	<i>Nat. Phys.</i>	<i>Nat. Photon.</i>	<i>Nat. Nanotechnol.</i>	<i>Nat. Mater.</i>	<i>Phys. Rev. Lett.</i>
2012	6	2	7	1	2	1	119
2013	4	3	3	0	1	4	114
2014	3	9	13	0	6	12	82
2015	2	11	10	1	2	11	144
2016	2	11	17	2	6	24	177
2017	6	5	17	1	5	11	151
2018	9	5	12	2	5	4	139
2019	14	11	17	0	7	6	126
2020	21	14	21	3	8	7	222

最多的学科, 物理领域的重大科研仪器追求接近物理极限的实验精度, 代表着科学仪器的极致追求, 我国科学家在关键科学仪器设备自主研制方面取得了重要进展, 并产生了一系列突出的研究成果; 人才资助体系趋于完备, 评价机制日臻完善, “优青”“杰青”“创新群体”资助了一批凝聚态物理领域的杰出人才, 为学科发展储备了一支青壮年人才队伍。但我们也发现了三方面的问题: 首先, 基础研究的“根”扎得不够深, 纵览我国科学家近年来的研究进展, 其中以对理论预言的实验验证或是对原有体系的拓展为主, 尚缺乏真正意义上的“原创成果重大突破”, 究其根本, 就是基础研究的“根”扎得不够深, 需从项目布局上充分考虑“鼓励探索, 突出原创”, 引导科研人员真正扎根基础、解决难题, 提出新理论、发现新现象、实现新方法; 其次, 对

面向国家需求的科学问题凝练不够, 例如半导体基础物理、磁学与自旋电子学是当今半导体科学技术的基础, 但在重点和重大类型项目中申请和资助较少, “后摩尔时代”技术路线尚不明确, 我国在先进芯片领域受到西方制约, 亟需引导凝聚态物理科研工作者关注国家需求, 从基础物理和微观原理出发, 凝练技术瓶颈背后的关键科学问题; 最后, 人才队伍的配备不够齐全, 物理学是与化学、生物学等同等地位的一级学科, 凝聚态物理更是物理学最大的分支, 其基础性、前沿性、应用性强, 战略意义重大, 但2011–2021年间国家杰出青年科学基金项目获得者仅34人, 这显然暴露出了人才队伍配置不合理的问题, 我们呼吁国家在凝聚态物理学乃至整个物理学加大投入, 支持更多优秀人才从事研究。

2.2 中美自然科学基金资助情况对比分析

我们基于美国国家自然科学基金会(NSF)公开数据进行分析, 并与我国国家自然科学基金资助情况进行对比.

从美国NSF资助项目数据库“Awards Advanced Search”进行检索, 勾选“Active Awards”和“Expired Awards”选项, Program Information中的NSF Organization选择“MPS-Direct For Mathematical & Physical Science”, Program选择“CONDENSED MATTER SCIENCES-RESR, CONDENSED MATTER PHYSICS, CONDENSED MATTER & MAT THEORY”, Start Date选择“Find dates on or after”填写From (01/01/2011), 将得到从2011年1月1日起至检索日获得资助的凝聚态物理学科项目列表, 如果填写关键词“Keyword”, 将得到该关键词下的项目列表. 按照以上检索条件, 截至笔者检索日期(北京时间2021年12月3日), 共得

到美国NSF数学物理科学部自2011年1月1日起资助的凝聚态物理学科项目共计1757项, 资助总金额7.25亿美元.

应用VOSviewer软件(VOSviewer, Visualizing scientific landscapes, <http://www.vosviewer.com>)对美国国家自然科学基金会2011–2021年资助的1757项凝聚态物理相关项目进行了关键词的聚类分析和可视化, 该分析针对项目题目和摘要进行. 图5给出了分析结果, 其中每个圆点代表一个关键词(主题词), 圆点之间的连线构成关键词之间的“共现”网络, 即两个关键词同时出现在一个项目题目或摘要中的频次, 构成两个关键词之间的关联, 圆点的大小代表该关键词在所有项目中出现的频次(圆点越大表示出现频次越高, 反之亦然). 从图5可以看出, 美国NSF资助项目大致可以分为三个聚类: (1) 量子现象相关(红色与黄色), 包括关联电子体系、拓扑凝聚态体系、超导物理、量子计算与

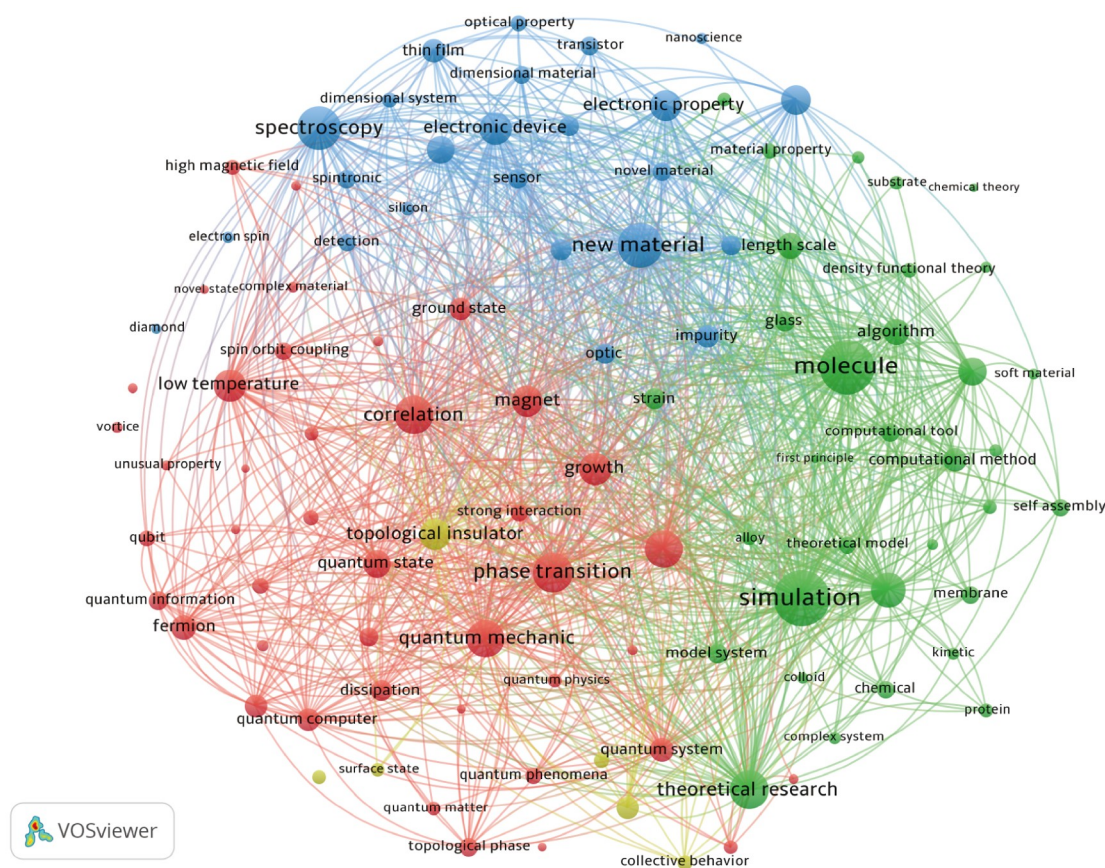


图5 (网络版彩图)美国自然科学基金会2011–2021年资助凝聚态物理相关项目的关键词图谱(采用VOSviewer可视化)

Figure 5 (Color online) Keywords map of the condensed matter physics related research programs funded by NSF (U.S.) during 2011–2021 visualized by VOSviewer.

量子信息、磁性、低温物理等; (2) 计算与模拟(绿色), 包括计算方法、模拟、材料设计、第一性原理、理论模型等; (3) 新材料与器件(蓝色), 包括新(先进)材料、电子器件、低维材料、晶体管、纳米科学等. 以上三个聚类反映了美国凝聚态物理研究主要以凝聚态体系的量子现象为研究前沿和主流核心, 以先进的计算模拟方法为新的研究范式, 以新材料和新器件为应用载体. 该聚类网络和关键词图谱基本反映了当前凝聚态物理研究的全貌, 出现频次较高的关键词包括: 相变、磁性、关联、量子力学、量子计算、(材料)生长、量子体系、拓扑绝缘体、拓扑相、费米子、低温、分子、模拟、计算方法、第一性原理、模型系统、材料设计、算法、软物质、新材料、电子器件、晶体管、光谱、低维体系、自旋电子学等. 以下我们将以典型关键词下的项目分布进行中美科学基金对比分析.

以上述美国NSF关键词聚类分析为基础, 挑选出现频次较高的关键词, 结合凝聚态物理学科基金项目管理的经验进行适当补充和调整, 构成凝聚态物理学科中美科学基金对比关键词表(表a1). 基于这些关键词, 我们对比了中国和美国自然科学基金资助金额的分布情况(如图6). 统计得到美国自然科学基金的资助金额普遍高于我国, 这与两国自然科学基金项目的检索条件有关系, 美国NSF检索关键词是针对项目题目和摘要, 而中国自然科学基金项目检索关键词是针对申请书中填写的关键词表, 由此得到的资助强度对比与实际情况会有差异, 但这不影响我们对资助领域的分布趋势进行分析. 图中按照中国科学基金资助金额对关键词进行了排序, 中国自然科学基金资助金额较高的关键词有: 超导、拓扑、显微、密度泛函理论/第一性原理/从头算、二维/低维、电子结构、相变、高压、铁电/铁磁/多铁、半导体, 美国自然科学基金资助金额较高的关键词有: 拓扑、超导、二维/低维、器件、显微、量子计算/量子比特、半导体、量子材料、石墨烯、光谱. 我们看到, 中国和美国科学基金在凝聚态物理学科均重点关注超导物理、拓扑体系和二维/低维系统, 这些领域是近年来凝聚态物理学研究的热点. 与中国科学基金相比, 美国科学基金在凝聚态物理学科的器件研究、量子材料、低温及光谱学研究方

面投入比例更多, 而中国科学基金在高压物理和电子结构等领域则比美国有更多资助.

由此可见, 中国和美国科学基金在凝聚态物理学科的资助布局基本一致, 即主要面向以量子现象为主题的前沿研究, 以超导物理、拓扑凝聚态体系、低维系统为主要研究热点, 以计算和模拟为重要的研究范式, 以新材料的设计和发现为突破口, 以器件应用作为研究牵引. 从中美两国科学基金资助布局, 可窥见凝聚态物理学科的发展规律和研究特点. 第一, 基础和前沿是凝聚态物理研究的主旋律, 体现了人类探索自然的好奇心是凝聚态物理研究的本源; 第二, 广泛的应用背景是凝聚态物理研究的强大驱动力, 典型的例子是作为当今信息技术基础的半导体物理; 第三, 计算模拟成为凝聚态物理重要的研究范式, 架设了理论和实验间的桥梁; 第四, 不断深化的学科交叉融合促进了凝聚态物理学的发展, 软凝聚态与生物物理、基础能源物理、量子调控成为凝聚态物理重要的交叉领域.

3 凝聚态物理学科发展布局

2020年以来, 国家自然科学基金委数学物理科学部组织专家, 开展了物理学“十四五”和中长期发展规划战略研究²⁾, 明确了学科内涵, 制定了学科布局. 以下结合我国自然科学基金2011年以来的资助布局情况和物理学科发展规划要点, 总结凝聚态物理学科发展布局, 提出建议重点发展方向.

3.1 超导与强关联体系

我国已在铁基超导、拓扑超导、二维关联材料等方向上做出了多项重要的工作. 目前, 该领域布局较完善, 实验手段齐备. 但总体上特别是在原创的实验成果和理论方面仍和本领域传统强国有一定差距. 未来布局重点强调对新材料、新现象和新机理的探索, 并以此为基础, 带动整个领域的发展.

根据学科发展现状和趋势, 超导与强关联领域建议重点发展的研究方向包括:

- (1) 超导与强关联体系的原创性理论和计算方法;
- (2) 高温超导体机理的判定性实验;

2) 主要参考: 《物理学发展战略研究: 2021-2035》, 待出版.

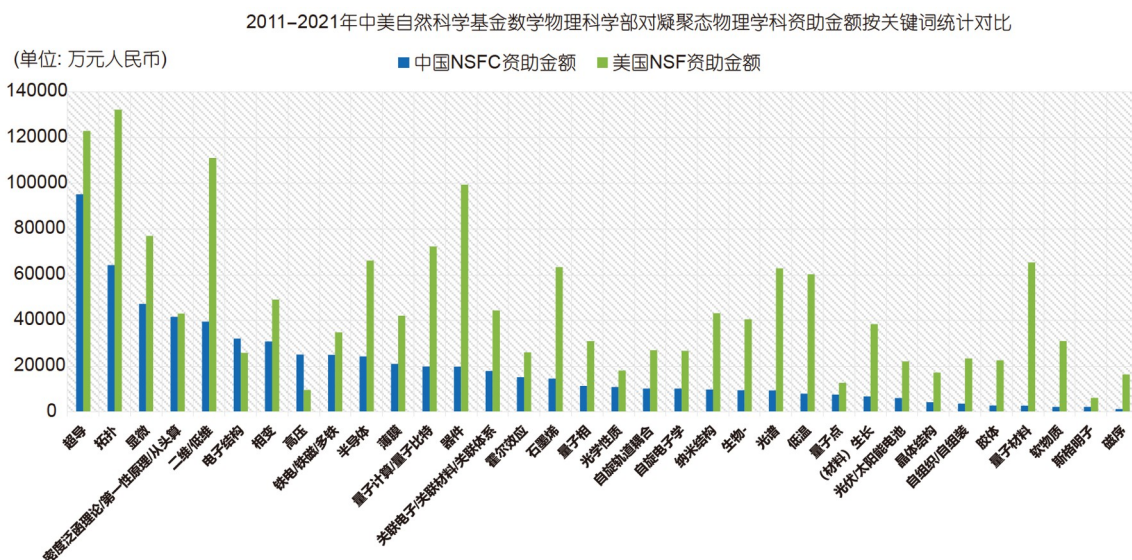


图 6 (网络版彩图)中美自然科学基金数学物理科学部2011–2021年对凝聚态物理学科资助金额按关键词统计对比(美元折算价按照2021年12月10日中国银行外汇牌价6.3702计算)

Figure 6 (Color online) Statistical comparison of fundings among keywords in research programs of condensed matter physics funded by NSFC and NSF (U.S.) during 2011–2021 (The exchange rate 6.3702 is according to the value given by Bank of China on Dec. 10, 2021).

- (3) 新型非常规超导材料探索与制备;
- (4) 拓扑超导新体系探索;
- (5) 室温超导的超高压实验研究;
- (6) 基于关联电子材料的器件开发;
- (7) 超导与强关联体系相关仪器研制.

3.2 磁学与自旋电子学

我国学者在稀土永磁材料、磁制冷材料、自旋电子学、表面与低维磁性、多铁性与磁电耦合和生物医学交叉等方面做出了具有国际影响力的工作. 中国科学院强磁场科学中心、国家脉冲强磁场科学中心(筹)等大科学装置综合性能处于国际领先地位, 可为多学科研究提供强大的科研平台. 但我国在现代磁学前沿领域的原创性成果较少, 与美国、日本、欧洲相关研究机构尚存在显著差距.

目前我国在磁学与自旋电子学领域的基础研究布局包括: 实空间与动量空间的拓扑磁性、低维磁性物理和量子奇异现象、异质结界面磁性物理、飞秒磁学与超快自旋动力学、磁性量子理论、自旋电子学物理及应用、磁性功能材料与物理、磁性表征的新方法和新技术以及磁学与其他学科的交叉等.

根据学科发展现状和趋势, 磁学与自旋电子学领域进一步的发展目标是在保持已有布局优势方向的前

提下, 开拓布局磁学基础研究的新增长点, 组织布局磁学应用研究方向, 并鼓励磁学与其他学科的深度交叉研究. 需要布局的磁学新增长点包括: 低温、高压等极端环境下磁性物理与磁性材料探索, 磁性探测表征新方法与新技术, 层状二维范德华磁性材料, 自旋波和磁子学, 自旋流探测新颖量子态, 反(亚)铁磁自旋电子学, 太赫兹自旋电子学, 腔自旋电子学, 利用自旋动力学随机过程的新型器件等.

3.3 低维体系与拓扑材料

我国的低维体系与拓扑材料物理研究水平在若干方向上处于国际领先地位. 在拓扑材料和界面高温超导等研究方向取得了国际领先的研究成果. 该领域接下来的研究关键在于基于发现的各种拓扑与低维量子材料, 实现各种新奇拓扑量子效应, 并探索拓扑量子效应的应用.

根据学科发展现状与趋势, 低维量子材料领域拟重点发展低维体系与拓扑材料中的量子态研究, 促进表面界面物理与高温超导、半导体物理、磁学和材料学科的全面交叉和融合.

- (1) 需继续加强的优势方向包括: 二维米级单晶材料及其异质结制备; 低维超导体中界面高温超导与量子相变、量子相等方向的研究; 磁性拓扑材料和量

子反常霍尔效应; 马约拉纳零能模和非阿贝尔量子统计; 低维拓扑电子材料及其器件研究; 范德华外延生长技术等.

(2) 需加强的薄弱方向包括: 高质量二维单晶材料制备及其纵向异质结构控制; 基于拓扑量子物态和效应的器件应用相关理论和实验研究; 低维材料性能与结构相关性的深入研究; 低维材料新体系的制备与理论预测; 低维强关联材料的可控生长; 低维体系的先进显微学表征及其技术等.

(3) 鼓励的交叉方向包括: 低维结构与拓扑材料的交叉; 物理前沿与重大应用的交叉; 与超导、磁学、半导体、能源、材料等传统领域的交叉; 低维材料制备与显微学的交叉; 低维材料与信息科学的交叉; 低维材料与物理化学、生命科学的交叉等.

(4) 应促进的前沿方向包括: 多层石墨烯或过渡金属硫族化合物二维纵向叠层体系中强关联效应研究; 超高真空分子束外延生长技术与极端条件原位谱学表征和综合物性测量技术; 强关联及磁性体系的拓扑理论以及长程纠缠拓扑的材料和相关实验研究; 低维新材料的探索与应用开发; 低维材料原子级别可控生长及修饰; 常压下低维高温超导材料的预测和探索; 体相材料和复合材料中的低维问题等.

3.4 半导体物理

半导体物理是凝聚态物理的重要分支学科, 当今半导体科学技术的成功可以归因于20世纪四五十年代以来, 国际上具有远见卓识的科学家、企业家重视开展半导体物理研究. 半导体物理研究也促进了整个凝聚态物理的大发展, 不但参与了整数、分数霍尔效应及后来的自旋霍尔效应、量子反常霍尔效应等新奇量子现象的发现, 而且许多新奇量子效应和元激发的载体本身就是半导体.

我国没有跟上20世纪半导体产业大发展的节奏, 没能形成数量庞大的半导体物理研究队伍. 近年来我国在半导体芯片核心技术方面“卡脖子”现象实际上反映的是基础的缺失. 在与国外产业技术严重失配的情况下, 关键技术瓶颈背后的基础科学问题研究动力不足, 传统半导体物理研究呈现弱势. 彻底扭转半导体产业落后局面需要真正重视半导体物理的基础研究, 并注重半导体基础物理研究与产业技术需求的有机结合.

根据学科发展现状和趋势, 半导体物理领域建议重点发展的研究方向包括如下几方面^[16].

(1) 半导体能带理论, 包括发展更加普适和精确的密度泛函理论和第一性原理方法, 发展与GPU等先进硬件平台相结合的计算技术, 发展遗传算法和基于人工智能的机器深度学习方法, 注重半导体界面效应的研究等.

(2) 半导体声子物理, 包括低维半导体系统中的声子拉曼光谱和声子输运、声子晶体研究、基于声子的量子调控和量子信息以及半导体激光制冷等.

(3) 半导体缺陷与掺杂物理, 包括低维半导体的缺陷与掺杂、宽禁带半导体的非传统杂质掺杂、半导体和绝缘体中的磁性掺杂、有机/混合半导体中的缺陷性质、表面转移掺杂、光照条件下的缺陷行为、半导体器件中的缺陷与杂质物理、新的能带结构和缺陷计算方法等.

(4) 半导体低维量子结构, 包括高质量半导体量子点的制备及其光学性质和量子态调控、基于半导体量子点的单光子和纠缠光子源、半导体量子点-表面等离激元耦合、栅控量子点和量子线中的量子输运及量子比特的实现等.

(5) 半导体中的光与物质强相互作用, 主要包括激子激化激元凝聚体的量子调控, 关注新材料、新机制及实验研究、新物理探索和器件应用等.

(6) 半导体中的自旋量子现象, 包括半导体中单自旋的操控及高保真度多自旋量子比特, 半导体自旋电子器件中的自旋注入、检测和滤波, 半导体中光激发诱导的自旋极化现象, FM/2DEG/FM横向自旋阀器件、自旋Hall晶体管和自旋FET, 居里温度高于室温的本征稀磁半导体以及稀磁半导体中的新奇物理效应, 硅自旋电子学及其量子计算, 宽禁带半导体中的自旋量子现象等.

(7) 半导体/非半导体界面物理, 包括半导体与磁性材料、复杂金属氧化物和超导体等界面的晶格和轨道再构、电荷转移现象和界面新奇量子效应等.

(8) 半导体中的输运及其动力学过程, 包括自旋输运与自旋动力学过程、半导体中的热输运和热电效应、输运测量的先进实验技术与方法、半导体量子输运理论及其数值模拟方法等.

(9) 量子霍尔效应, 包括与半导体及其低维体系与异质结相关的量子霍尔效应、量子自旋霍尔效应、量

子反常霍尔效应、非阿贝尔任意子以及相关的材料与器件制备、先进实验技术与理论方法等.

(10) 二维原子晶体及范德瓦尔斯异质结构, 包括高质量新型二维材料及其范德瓦尔斯异质结构的制备、物性与器件应用等.

(11) 新概念半导体器件, 包括新型半导体激光光源、新概念与新原理半导体器件、光量子计算器件等.

(12) 新测量技术, 包括近场扫描光学显微镜、时间分辨光学扫描显微技术、与激光结合的扫描隧穿显微镜、量子断层测量等技术在半导体物理中的应用与发展.

3.5 计算凝聚态物理

计算物理现已成为物理学研究中发展最为迅速的学科方向之一, 形成了与实验物理和理论物理相辅相成的第三种研究范式. 计算凝聚态物理研究范畴涉及纳米、磁学、表面、光学、极端条件、超导、拓扑、强关联电子系统乃至软物质等. 我国在计算凝聚态物理领域主流方向上做出了可喜成果, 尤其是在新兴的拓合物态方面, 多次成功预言若干重要拓扑材料. 但是要真正有效面对国家战略需求和参与国际竞争, 必须建立自己的专业梯队, 特别是加强关键计算方法和相关软件的发展, 解决一些核心理论问题、算法问题和软件开发问题, 提升我国在这个领域的上游竞争力. 此外, 还要加强必要的计算设备, 特别是大规模、超大规模并行计算环境, 以及与之相适配的大规模、超大规模并行程序软件, 最终应用于各类物理问题、材料问题和器件问题研究.

根据学科发展现状和趋势, 计算凝聚态物理领域建议重点发展的研究方向包括如下几方面.

(1) 第一性原理物性计算与材料预测, 特别是直接计算和模拟使役环境下的真实体系, 需要更快、更大、更准的第一性原理计算, 更长时间尺度的分子动力学模拟等.

(2) 第一性原理计算方法和程序发展, 开发自主知识产权的计算软件, 发展更为准确普适的交换关联泛函从而提高计算精度和速度等.

(3) 基于第一性原理计算的材料设计, 例如材料基因组工程、高通量第一性原理材料计算、逆向材料设计等.

(4) 电子激发态方法的发展, 例如超越玻恩-奥本海默近似的动力学方法、含时密度泛函理论、非绝热近似分子动力学等.

(5) 固体结构解析与相变研究, 未来发展方向包括大尺度、高温、基于机器学习算法提高搜索效率、强关联体系等.

(6) 统计与动力学模拟, 包括量子热力学统计层面的新计算方法, 例如针对核量子效应模拟的路径积分分子动力学等.

(7) 强关联电子体系, 大规模数值模拟及其方法在强关联理论研究中占据了非常重要的位置, 一些重要的发展包括数值重整化群、密度矩阵重整化群、张量重整化群算法等, 需要进一步加强研究.

3.6 软凝聚态与生物物理

软凝聚态物理建议重点发展的研究方向包括如下几方面.

(1) 软凝聚态理论基础与实验方法, 发展非平衡统计物理方法, 建立理论-模拟-实验相结合的统计物理研究范式; 侧重各向异性胶体颗粒新型制备技术等实验方法.

(2) 软凝聚态介观体系, 活性物质系统中集体运动的定量理论模型与基本机制研究, 微纳米尺度的高效可控自驱动机器人, 软物质体系特别是胶体系统的相变研究, 颗粒物质的微观结构与动力学研究等.

(3) 软凝聚态低维与界面体系, 设计和制备高性能胶体微器件, 开发新型软凝聚态低维与界面体系, 并研究其相行为及自组装, 发展针对软凝聚态低维与界面体系的计算机模拟新方法等.

(4) 水科学, 借助先进的低温实验技术, 从原子/分子尺度研究水的微观结构及其与界面体系的相互作用等.

(5) 液晶, 液晶物理特性和显示器机理研究, 液晶体系自组装特性及其光、电、磁、热响应特性; 生物体系中的液晶研究等.

生物物理领域加强物理学与生命科学的大交叉和大整合, 围绕系统的生物功能及其蕴含的非平衡统计物理特性和动力学等关键科学问题, 发展适用于描述生命系统的多尺度、多维度复杂动力学行为的非平衡统计物理新理论, 综合运用分子和网络建模、定量分析方法以及动力学理论, 加强研究生命分子和细胞体

系的非平衡物理特性及其运行机制, 阐明这些生命系统内在结构、功能和动力学之间的定量规律, 为与生命科学交叉的研究提供新的物理学理论和定量研究方法及其实验表征手段. 注重各种新实验技术和方法的发展, 强调基于精密物理测量的定量刻画和基于精确数学描述的严密分析来研究生命现象中的基本物理和化学规律. 布局单分子、单颗粒、单细胞、多细胞动力学的新原理和新方法研究, 鼓励针对由多个生命小系统耦合形成的复合小系统的多尺度随机热力学、非平衡统计物理和动力学研究. 鼓励多尺度成像融合、离体和在体相结合、实验测量和理论计算相结合等的整合科学研究新模式. 鼓励发展面向活体的单分子研究、布局类器官芯片等三维生物芯片研究. 布局脑科学相关的细胞动力学研究、神经科学和人工智能的交叉研究; 鼓励人工智能技术在物理与生命科学交叉领域的应用, 强化对复杂系统规律的探索.

3.7 基础能源物理

获得清洁和可持续发展的能源是我国乃至全人类共同面临的重大问题. 由于物理学研究对象是能量、物质及其运动规律, 因此它在能量的转换、存储、传输以及使用等关键能源科技研发上将扮演极为重要的角色. 基础能源物理就是基于物理学的基本概念、科学思想、计算方法和实验表征从基础科学的视角系统地研究能量转换、存储、传输与使用以及能量转换过程的物理限制等关键科学问题. 能源科学研究的基本对象常常具备时空有限和非平衡等特征, 而信息辅助作用对能量转换的影响也会愈来愈大. 所以实现微观尺度上能量转换和信息传递的调控. 如用人工合成系统模拟生命系统中近乎完美的高效能量转换功能. 因此, 在能源科技战略需求牵引下, 物理学将与包括化学、生命、信息科学等学科进一步交叉, 有望在能源物理领域中产生基础科学的源头创新.

3.8 量子调控物理

鉴于量子物理基础与量子信息科技发展的重要意义, 我国政府高度重视该领域的发展, 《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006–2020)》将“量子调控研究”列入科技部四项“重大科学研究计划”之一, 基金委数学物理科学部专门设立了“单量子态的探测及相互作用”和“精密测量物理”重大研究计划. 在以上国家战

略和研究计划的支持下, 我国科学家通过前期探索性研究, 在量子调控物理领域取得了具有国际影响的创新成果.

根据学科发展现状和趋势, 基金委数学物理科学部于2020年启动“第二代量子体系的构筑和操控”重大研究计划, 并在2021年启用的新申请代码体系中增设“量子调控”为物理I学科5个一级申请代码之一.

基于凝聚态体系的量子调控领域建议重点发展的研究方向包括:

- (1) 量子材料与物性调控;
- (2) 量子结构与量子效应;
- (3) 基于凝聚态体系的量子精密测量;
- (4) 固态量子计算与量子通信;
- (5) 量子器件物理.

结合科学目标和我国在相关领域的研究基础, 优先发展可以尽快实用化或者具有颠覆性技术的创新领域, 例如基于超导、量子点、固态自旋等具备良好可扩展性物理体系的固态量子计算; 体现量子优势的量子算法、量子编程和量子机器学习; 基于单自旋的量子灵敏探测及单分子水平的结构分析和成像等.

4 政策建议

物理学是基础科学的基础, 而凝聚态物理学又是物理学最大的分支, 我国凝聚态物理学发展已经取得了长足的进步, 在某些领域甚至已经达到了国际领先的水平, 但整体而言与国际上凝聚态物理的最高水平尚有一定的距离. 如何在现有的基础上, 加快我国凝聚态物理科学研究, 缩小与发达国家的差距, 成为凝聚态物理学强国是我们当前和未来长期的主要目标. 综合当前我国凝聚态物理学科的发展现状和国家发展需求, 我们从以下几个方面提出政策建议.

4.1 鼓励“无用之用”, 促进原创探索

近十年来, 我国科学家在凝聚态物理领域取得了一系列重要的研究进展, 有些研究成果已经达到国际领先的水平. 但总体而言, 真正的“原创成果重大突破”尚不多见, 追热点、随大流的科研现象仍然存在, 迫切需要从更加基础的层面鼓励原始创新, 建议如下.

第一, 鼓励“无用之用”, 坚持锐意创新. 基础研究的开展, 可以探索和认识客观世界的规律, 并拓展人类

的知识边界, 其重大突破, 往往在发现之初或为偶然, 或在当时并无明显的用处. 然而, 历史和实践证明, “无用”的基础研究是“科学-技术-生产力”链条的首要因素, 自由探索式的基础研究在不经意间可能孕育着重大技术变革, 当前“无用”的探索很可能会以某种无法预见的方式在未来变得“有用”^[17]. 国家有关部门应引导社会舆论, 对基础研究从认识上做出改变, 鼓励“无用之用”, 欢迎标新立异, 容许探索失败, 形成更加理性和开放的基础研究价值观.

第二, 持续推进科学基金改革, 为原创探索提供制度保障. 国家自然科学基金深化改革, 把原创探索提到了前所未有的高度, 对常规科学基金项目推行按照四类科学问题属性分类申请和评审, 其中“鼓励探索、突出原创”列在首位, 另专门设立原创探索计划项目, 这些举措为鼓励原创性研究项目提供了制度保障. 通过这些举措, 一方面, 更有效地遴选原创性强的研究项目, 另一方面, 引导整个学术界的创新观念. 我们建议创造更加宽松的资助措施, 更加宽容失败的创新环境.

4.2 基础研究面向国家需求, 积极应对新的国际形势

凝聚态物理是基础性和应用性都很强的学科, 是信息技术和能源技术的基础. 核心技术的积累, 是靠持续研发投入得来的. 在新的国际形势下, 凝聚态物理学的发展应在注重基础和前沿的同时, 面向国家重大需求, 坚持自由探索与战略导向相结合, 重视技术瓶颈背后的基础物理问题, 注重问题导向的研究, 针对未来产业发展的关键核心技术, 实现原理性突破, 解决“卡脖子”问题, 建议如下.

第一, 加强半导体基础物理, 夯实产业发展根基. 半导体产业是中美差距最大的产业之一, 也是近年来我国同以美国为首的发达国家经济和技术角力的关键. 当前我国半导体基础材料和元器件研发较薄弱, 建议规划大型半导体综合性研发机构, 把我国半导体产业从中间环节断裂的创新链条串起来. 半导体技术的进步植根于物理机制的创新, 须对半导体物理加以重视, 倡导微观基础物理层面的半导体研究, 注重半导体基础物理研究与产业技术需求的有机结合, 在与半导体工艺、器件、可靠性等应用研究的相互交叉中形成合力, 同时恢复半导体物理专业以储备人才.

第二, 重视科学仪器研制, 培育尖端精密制造. 科学仪器是一个研发周期长、技术壁垒极高的行业, 先

进科学仪器及其核心部件是发达国家对我国限制出口的重要内容. 鼓励科研人员开展科学仪器的自主研发, 彻底摒弃“造不如买, 买不如租”的错误思想. 进一步完善“国家重大科研仪器研制项目”的资助模式, 加大对仪器研制人才的支持力度. 优化评价机制, 给予从事仪器研制和创新的人员更大的认可和支持. 鼓励企业参与科学仪器研发, 设立多级产学研转化项目, 推动实验室设备的商品化.

第三, 推动计算物理软件研发, 奠定未来工业设计基础. 以传统计算物理为基础的工业软件是现代工业设计自动化和精密制造的灵魂, 也是我国工业现代化进程中的一大门槛. 当前蓬勃发展的现代计算物理学, 例如以密度泛函理论为代表的计算凝聚态物理等, 极有可能成为未来工业技术设计自动化的基础. 应重视计算物理方法的研究, 并鼓励相关应用软件的自主研发. 鉴于发展计算方法和开发软件是一个长期而庞大的工程, 应加大人力和物力的投入, 必要时设立国家重大研发专项, 例如以“国家重大科研仪器研制项目”的形式支持重大国产科学软件的研发, 给予相关科研人员更加长期、稳定的经费支持.

4.3 优化科研经费投入结构、提高科研经费使用效率

我国科学基金在凝聚态物理基础研究投入总量和强度已与美国等发达国家和新兴工业化国家差距不大. 但在投入结构、产出效率等方面仍有不足. 为此, 我们建议如下.

第一, 保证持续稳定的经费投入. 着眼国家战略需求, 立足我国国情, 加强对若干重点领域的持续稳定支持, 包括对国家未来科技战略具有重要意义的量子调控以及产业发展急需的自旋电子学和半导体物理等.

第二, 维持学科均衡稳定发展, 加大对薄弱环节的投入. 有些研究领域起步晚, 规模小, 研究水平较落后, 但又是学科发展不可或缺的一部分. 在科研经费投入中应充分考虑不同学科目前发展水平的特殊性, 避免学科萎缩和人才流失.

4.4 完善科研用人体系, 优化科研队伍结构

合理的用人体系, 鼓励创新的机制和良好的科研氛围, 可以充分发挥科学家的工作热情. 为此, 我们建议:

第一, 扩大学科高端人才队伍. 国家杰出青年科学

基金、优秀青年科学基金等人才项目在我国科技发展过程中起到了积极作用,但随着科技的快速发展,科技人才体量与科技发展需求不匹配,当前凝聚态物理学科资助高端人才数量与其在科学体系中的基础地位不匹配,影响了学科的发展,建议继续增加人才项目支持人数,持续关注凝聚态物理学科高端人才培养。

第二,完善同行专家评审机制.建立“负责任、讲信誉、计贡献”的专家评审制度和国际同行专家参与

评议的机制.在评价体制上不再追求短期效应,而是注重对个人科研工作的中长期评价,引导面向核心问题和公开难题的研究。

第三,根据学科发展规律制定均衡而全面的人才规划.提倡按需引进人才,避免热门领域重复发展、盲目引进,保护非热门领域的学科发展.提高研究队伍的质量.结合国内、国际同行评审机制,进一步推广“预聘-长聘”制度。

致谢 本文的写作受益于与许多科研一线科学家的交流和讨论. 特别感谢物理学科“十四五”与中长期发展规划战略研究专家组和秘书组,以及参与这项工作的广大科学家,他们集体智慧与辛勤工作形成的《物理学发展战略研究: 2021–2035》是本文的重要参考. 感谢国家自然科学基金委员会数学物理科学部物理科学一处凝聚态物理流动项目主任齐静波教授在凝聚态物理有关研究方向的讨论,感谢中国科学院文献情报中心沈湘副研究员对于VOSviewer软件使用上的指导,感谢中国科学院半导体研究所常凯院士在半导体物理发展方向方面的指导,感谢中国科学院物理研究所金魁研究员在超导领域发展现状方面的讨论. 最后感谢学术界广大科研工作者对国家自然科学基金凝聚态物理学科工作的支持!

参考文献

- 1 Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China. Report on the 13rd Five-Year Plan on Mathematical and Physical Science of National Natural Science Foundation (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [国家自然科学基金委员会数学物理科学部. 国家自然科学基金数理科学“十三五”规划战略研究报告. 北京: 科学出版社, 2017]
- 2 National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China's Disciplinary Development Strategy in Next 10 Years: Physics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012 [国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 未来10年中国学科发展战略: 物理学. 北京: 科学出版社, 2012]
- 3 National Natural Science Foundation of China. National Natural Science Fund Guide to Programs 2021 (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [国家自然科学基金委员会. 2021年度国家自然科学基金项目指南. 北京: 科学出版社, 2021]
- 4 Anderson P W. More is different: Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. *Science*, 1972, 393: 177
- 5 Liu Y H, Gao Z Y, Hao Y N, et al. Analysis of scientific issues attribute distribution and suggestions under the funding categories of NSFC in new era (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2019, 33: 508–513 [刘益宏, 高阵雨, 郝艳妮, 等. 新时代国家自然科学基金资助向下项目科学问题属性分布现状梳理及有关思考. 中国科学基金, 2019, 33: 508–513]
- 6 Jiang X W, Ni P G, Dong G X, et al. Review of major research plan on “Detection and Interaction of Single Quantum States” (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2019, 33: 467–474 [姜向伟, 倪培根, 董国轩, 等. “单量子态的探测及相互作用”重大研究计划结题综述. 中国科学基金, 2019, 33: 467–474]
- 7 Jiang X W, Ni P G, Dong G X, et al. Design, fabrication and physical manipulation of novel quantum systems (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2020, 34: 207–212 [姜向伟, 倪培根, 董国轩, 等. 新奇量子体系的设计、制备和物性操控. 中国科学基金, 2020, 34: 207–212]
- 8 Chang C Z, Zhang J, Feng X, et al. Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator. *Science*, 2013, 340: 167–170, arXiv: [1605.08829](https://arxiv.org/abs/1605.08829)
- 9 Wang C M, Sun H P, Lu H Z, et al. 3D quantum Hall effect of fermi arcs in topological semimetals. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 136806, arXiv: [1705.07403](https://arxiv.org/abs/1705.07403)
- 10 Zhang C, Zhang Y, Yuan X, et al. Quantum Hall effect based on Weyl orbits in Cd₃As₂. *Nature*, 2019, 565: 331–336
- 11 Liu Q, Chen C, Zhang T, et al. Robust and clean Majorana zero mode in the vortex core of high-temperature superconductor (Li_{0.84}Fe_{0.15})OHFeSe. *Phys Rev X*, 2018, 8: 041056
- 12 Zhu Z, Papaj M, Nie X A, et al. Discovery of segmented Fermi surface induced by Cooper pair momentum. *Science*, 2021, 374: 1381–1385, arXiv: [2010.02216](https://arxiv.org/abs/2010.02216)
- 13 Yu Y, Ma L, Cai P, et al. High-temperature superconductivity in monolayer Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ}. *Nature*, 2019, 575: 156–163

- 14 Yuan J, Chen Q, Jiang K, et al. Scaling of the strange-metal scattering in unconventional superconductors. *Nature*, 2022, 602: 431–436
- 15 Wang Y, Wu T, Barbaud J, et al. Stabilizing heterostructures of soft perovskite semiconductors. *Science*, 2019, 365: 687–691
- 16 National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China's Disciplinary Development Strategy: Progress of Semiconductor Physics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略: 半导体物理学进展. 北京: 科学出版社, 2020]
- 17 Flexner A. The Usefulness of the Useless Knowledge. With a companion essay by Robert Dijkgraaf. Princeton: Princeton University Press, 2017 [亚伯拉罕·弗莱克斯纳, 罗伯特·戴克格拉夫. 无用知识的有用性. 张童谣, 译. 上海: 上海教育出版社, 2020]

附录

表 a1 中美自然科学基金资助凝聚态物理学科关键词对比

Table a1 The English keywords corresponding to the Chinese ones for NSFC/NSF (U.S.) comparison

序号	英文关键词	中文关键词
1	Superconduct	超导
2	Topological	拓扑
3	Microscop	显微
4	DFT/ <i>ab initio</i> /First-principle	密度泛函理论/第一性原理/从头算
5	Two dimension/Low dimension	二维/低维
6	Electronic structure	电子结构
7	Phase transition	相变
8	High pressure	高压
9	Ferroelectric/Ferromagnet	铁电/铁磁/多铁
10	Semiconductor	半导体
11	Thin film	薄膜
12	Quantum comput/Qubit	量子计算/量子比特
13	Device	器件
14	Correlated electron/Material/System	关联电子/关联材料/关联体系
15	Hall effect	霍尔效应
16	Graphene	石墨烯
17	Quantum phase	量子相
18	Optical property	光学性质
19	Spin orbit coupling/Spin orbit interaction	自旋轨道耦合
20	Spintronics	自旋电子学
21	Nanostructure	纳米结构
22	Bio-	生物-
23	Spectroscopy	光谱
24	Low temperature	低温
25	Quantum dot	量子点
26	Growth	(材料)生长
27	Photovoltaic/Solar cell	光伏/太阳能电池
28	Crystal structure	晶体结构
29	Self assembly	自组装/自组织
30	Colloid	胶体
31	Quantum material/Quantum matter	量子材料
32	Soft material/Soft matter	软物质
33	Skyrmion	斯格明子
34	Magnetic order	磁序

Trend analysis and development outlook for condensed matter physics: Discussions based on national natural science fund (2011–2021) and disciplinary development plan of physics

JIANG XiangWei^{1*}, NI PeiGen^{1*}, DONG GuoXuan¹ & XIE XinCheng^{2,3}

¹ Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100083, China;

² National Natural Science Foundation of China, Beijing 100083, China;

³ School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Condensed matter physics (CMP) is the biggest branch in physics, and one of the fastest growing areas in physics during the past half century. CMP is fundamental science with plenty inter-disciplinary applications to other subjects. It is the building-block of information science, material science and energy science, and connects physics with life science and chemical science. This paper reviews Chinese national natural science fund in CMP during 2011–2021, and provides a comparison with NSF (U.S.). It also summarizes the recent development plan of physics, and suggests the priority development areas in main branches of CMP.

condensed matter physics, natural science fund, development plan, disciplinary layout, priority areas

PACS: 71.15.-m, 72.25.-b, 73.20.-r, 74.20.-z, 75.20.-b

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0496](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0496)