

· 学科进展与展望 ·

重大研究计划“理论物理学及其交叉科学若干前沿问题”结题综述

欧阳钟灿^{1*} 万梅香² 陈润生^{3*} 赵光达^{4*}
陶瑞宝^{5*} 黄涛⁶ 梅良模⁷ 彭堃堦^{8*}

(1 中国科学院理论物理研究所, 北京 100080; 2 中国科学院化学研究所, 北京 100190;
3 中国科学院生物物理研究所, 北京 100101; 4 北京大学物理学院, 北京 100871;
5 复旦大学物理学院, 上海 200433; 6 中国科学院理论物理研究所, 北京 100049;
7 山东大学物理学院, 济南 250100; 8 山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

[摘要] 本文综述了重大研究计划“理论物理学及其交叉科学若干前沿问题”实施8年来所取得的成绩。列举了参加成员的创新成果和对解决核心科学问题的贡献。

[关键词] 重大研究计划, 理论物理, 交叉科学, 原始创新, 国际竞争能力

2000年, 当我国理论物理发展正处于关键时期, 国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)及时组织了跨4个科学部的“理论物理学及其交叉科学若干前沿问题”重大研究计划, 采取新的运行机制于2001年开始付诸实施。

8年来研究计划工作取得了显著的成绩, 总体上完成了预定的科学目标, 在多个国际前沿领域做出了有影响力的成果, 推动和造就了一支在我国这一领域能跻身于国际理论物理研究最前沿的队伍, 提升了参与国际竞争的能力。

1 立项背景

1.1 总体科学目标

(1) 按照21世纪理论物理前沿和交叉学科研究发展形势的要求, 拓宽、调整我国理论物理研究方向的配置。除在我们已有较强力量和积累的传统研究方向, 如粒子物理、量子场论、凝聚态理论等方向加强力量扩大优势之外, 特别要注重在学科交叉和跨学科研究领域, 如量子信息、有机固体和聚合物、材料科学计算物理中的基本理论物理问题, 以及生命科学启发的理论物理问题等相对薄弱的方面选择重要的研究方向, 积极探索研究, 逐步形成优势。

(2) 取得一批原始创新性的成果; 发表一批高质量的学术论文和专著, 力争在一定时期内率先解释或预言(预言后得到实验验证)2—3个有全局意义的重要实验结果; 在某些方向上做出独创而后由外国人跟随的原始创新性工作。

(3) 通过在认真选定的研究方向上持续研究实践, 培养、锻炼和发现人才, 特别注重不同思维类型人才的发现和培养, 造就一批立足国内、为国际一流同行所承认的优秀理论物理学家和能在相关交叉学科起关键作用的理论科学家。

1.2 总体布局和实施思路

逐步形成了“三大板块”、“9个前沿领域”相互交融、相互交叉的核心科学问题。

(1) 板块一: 最深层次物质结构和动力学规律的前沿领域, 包括: (i) 量子场论及与宇宙学相关的前沿理论问题; (ii) 粒子物理及与宇宙学相关的前沿理论问题; (iii) 高能重离子碰撞和强子物理中动力学规律的理论研究;

(2) 板块二: 凝聚态理论研究的前沿领域, 包括: (i) 强关联多电子系统的理论研究; (ii) 受限小量子系统的理论研究;

* 中国科学院院士。

本文于2010年3月15日收到。

(3) 板块三:跨学科理论研究新领域,包括:
(i) 理论物理与生命科学交叉的理论研究;(ii) 有机固体和聚合物的理论物理研究;(iii) 材料设计的基础理论研究;(iv) 量子信息的理论研究。

8年来,总计启动项目134项,参加者共258人次。在本重大研究计划的主导下,我国理论物理学工作者积极参与国际竞争,学术水平得到了很大的提高,在学科交叉方面也迈出了重要的一步,做出了一批立足国内、具有创造性的成果。理论物理研究发展所需的宽松学术气氛、高水平学术交流环境和相应的工作条件得到比较好的保证,已形成在全国范围内协力合作,开展联合研究的格局和传统。本研究计划的实施提高了向国际理论物理学最高水平进行冲刺的能力,也增强了为我国高新技术的发展提供前瞻性研究的实力。

2 创新性成果和对解决核心科学问题的实质性贡献

研究计划参加人员8年共发表论文3083篇,其中发表在影响因子2及以上的论文约占总数的50%。其中影响因子5以上的200余篇(其中PRL论文110篇,Phys. Rev.系列论文850篇)。

重大研究计划实施期间,有29位参加者获得国家杰出青年科学基金资助,有9人聘请为国家“973”或“863”计划项目首席科学家。国际会议邀请报告102人次。组织大型国际会议31次。

重大研究计划实施期间,参加者获得国家自然科学奖二等奖8项,国家科技进步奖二等奖1项。

培养博士毕业生809名,硕士毕业生764名,出站博士后161名。

8年中,通过参与此计划的全体人员的努力,目前已凝聚一支以中、青年人为主力,并已在理论物理学前沿各主要方向独立开展创造性研究的骨干科研队伍。这一批学术带头人能站在世界科学研究前沿,活跃在国际学术舞台上,为今后10—20年时间内在理论物理众多领域实现国际领先的战略目标准备了条件。

该重大研究计划的实施推动了理论物理与不同学科方向之间大交叉和大交流,组建了理论物理研究的新模式,为今后我国理论物理研究沿着这一正确方向,得到国家持续支持、取得突破性的发展和新飞跃提供了重要保证。尤其是本重大研究计划的实施,切实地把国内大部分本来都有能力得到基金项目的优秀科学家组织起来并且凝聚在一起,甚至不

同学科之间形成一个相互交流、交叉合作的大平台,促进了学科的交叉、实现对新理论物理研究方向的快速反应和布局,这也为下一步我国理论物理研究的战略飞跃起到了历史性的作用。

2.1 提出了新理论、新方法、发展了新的研究方向,取得了具有国际影响的创新成果,提升了研究领域水平

8年来在9个前沿领域完成了一批高质量的研究成果,有的属于原创性的理论,有的属于能指导或解释新实验的理论,它们在国际上对某些研究方向产生了重要影响,有的对我国理论物理及相关交叉学科的研究提高起到了重要作用。在完成高质量研究成果的同时明显地增强了研究队伍的创新能力和竞争能力。在9个方向上都有受到重大计划资助的专家提出了新理论、新方法、发展了新的研究方向,取得了具有国际影响的创新成果。

(1) 以自旋霍尔效应为例。自旋霍尔效应(霍尔效应是指当施加的外磁场垂直于导体中流过的电流时,会在导体垂直于磁场和电流的方向上产生霍尔电动势。由于载流子同时具有电荷和自旋属性,即使没有磁场时,由于载流子的运动也必将伴随着自旋的运动,也会产生这种自旋的横向运动,这种现象就是自旋霍尔效应)是一个新型的霍尔效应,是由于固体中自旋轨道耦合这种相对论效应引起的,是目前凝聚态物理中一个相当热门的研究方向。

中国科学家群体对自旋霍尔效应开展了深入而广泛的探索,取得了一系列在国际上有影响的创新成果,自2004年首次发现自旋霍尔效应以来,在PRL发表16篇论文,在国际上产生了重要影响。例如:(i)发现在一大类p型半导体内部,电场可以通过自旋轨道耦合作用产生自旋霍尔效应以及Zitterbewegung效应,诱导出的自旋流可作为自旋注入的方案。(ii)计算了空穴型掺杂的半导体量子阱的自旋霍尔系数,发现当掺杂浓度和自旋轨道耦合常数满足某种特定的关系时,体系的自旋霍尔系数会突然改变符号。这种随着空穴浓度或者自旋轨道耦合系数的改变而突然变号的性质,是内禀自旋霍尔效应所特有的奇异性质。利用这一有趣的特性,可以设计实验来验证实验上观测到的自旋霍尔效应是否是内禀的特性,同时还可以利用这一特性设计出新的自旋电子学器件。(iii)建立了关于n型和p型半导体中自旋霍尔效应的统一的理论框架。该理论可以很好地处理窄禁带半导体量子阱情形。利用外加电场和量子阱宽度可以在窄禁带半导体量子阱

中引起量子相变,从而实现本征自旋霍尔效应的开关。这种开关效应会被用来验证本征自旋霍尔效应的存在。在不外加磁场条件下,即使是在非磁性材料中,也可观测到内禀自旋霍尔现象,利用这种效应可产生自旋流,这种自旋流在自旋电子学领域将有可能产生深远的影响。提出了关于内禀自旋霍尔机制的量子理论,促进了量子理论的发展,也必将推动新的技术进步,例如可利用它的原理设计新型自旋电子学器件。

(2) 又如黄梅、庄鹏飞等提出的无能隙色超导理论。他们考察了费米面不同时的色和电中性条件,发现满足荷中性条件的色超导体是一个新的稳定的无能隙色超导理论。他们提出的无能隙色超导体为高密 QCD 相变作出了重要贡献,发展了色超导研究的一个新方向。13 篇代表性论文已被引用 1000 多次,受到国际同行的好评,多次在国际国内应邀作学术报告。

2.2 紧密结合国内外大科学装置做出了重要理论成果,提高了国内外理论实验结合和国际合作的能力

粒子物理与核物理是理论物理学学科的传统研究领域,其研究特点是与大型高能加速器的实验紧密联系,为其提供理论预言和解释实验结果。近年来,粒子物理与核物理的实验研究处于快速发展的时期。美国费米实验室的 Tevatron 强子对撞机和两个 B 介子工厂 Belle 和 BaBar 的丰富实验结果;相对论重离子对撞机 RHIC 提供了在实验室产生新的物质形态——夸克胶子等离子体的高温高密条件;我国的北京正负电子对撞机对 J/ψ 重夸克偶素和 τ 粲能区的物理研究起到了重要作用;特别是已投入运行的欧洲大型强子对撞机 LHC 的运行对于寻找 Higgs 粒子,重现宇宙早期状态,检验新理论与构造新理论有极其重要的意义。结合这些大科学装置,我们在粒子物理与核物理理论方面做了一批重要的工作。

(1) 以夸克胶子等离子体的信号为例。夸克胶子新物质形态的强作用硬探针信号是夸克物质理论和实验研究的关键。考虑到真实的夸克胶子物质是一个温度密度系统,华中师范大学王恩科与美国洛伦兹柏克莱国家实验室(LBNL)的王新年合作,(i) 发展出有限温度密度 QCD 理论框架下的夸克胶子物质中具有细致平衡效应的喷注能量损失;(ii) 利用携带夸克胶子物质的温度和密度信息,把观测到的喷注淬火特征曲线作为层析工具引导出喷注层析新研究方向;(iii) 给出了 3 个得到 RHIC 上

的国际实验合作组实验证实的理论预言:夸克胶子物质中喷注能量损失的细致平衡效应在中等横动量区有重要影响;夸克胶子物质中的喷注能量损失(胶子密度)比普通核物质中的喷注能量损失(胶子密度)大 15—30 倍;提出在核-核碰撞中间接观测喷注能量损失的新观测量——核修正因子 R_{AA} ,并预言 RHIC 实验中的 Au-Au 对心碰撞 $R_{AA} < 1$ 。

他们对一些已有的实验结果给出了一系列合理的理论解释。例如:用微扰 QCD 次领头阶计算解释 RHIC 高能核-核碰撞中的单喷注实验现象。研究分析表明普通核介质中喷注的能量损失正比于核半径的平方,解释了 HERMES 的实验结果。相关研究成果在 PRL 上发表 5 篇学术论文,在本研究领域级别最高的夸克物质会议的大会报告中被介绍过 3 次,并得到国际上理论学者的广泛引用。研究成果获教育部自然科学奖一等奖。

(2) 又如,重味物理和强子物理的研究是国内研究力量最强大的方向之一。围绕 BES 上的强子物理是当前 QCD 强子物理研究中的热点问题,中国科学院高能物理研究所、北京大学、中国科技大学、中国科学院理论物理研究所等各课题组密切结合我国 BES 物理的实验结果开展理论研究,特别是对北京谱仪上发现的新强子态 $X(1835)$ 的本质做了深入研究。中国科学院高能物理研究所、中国科学院理论物理研究所、北京大学等课题组结合两个 B 介子工厂对 CP 破坏机理研究,有关文章被国际同行关注并被大量引用,特别是两个 B 介子工厂实验组(Belle 和 BaBar)的很多引用;理论方法的发展直接导致了理论上很多衰变道的分支比和 CP 破坏等的准确预言。

(3) 具有到目前为止人类可控最高能量的大型强子对撞机(LHC)于 2009 年建成开始取数。邝宇平教授等应约撰文刊登于 2005 年关于 Higgs 物理的 CERN 黄皮书报告以及北京大学、中国科学院理论物理研究所的理论家们对于 LHC 物理系统、深入的研究取得了一批成果,获得了国内外同行的认可。

2.3 极大地推动了我国理论物理和交叉科学的研究

通过项目的实施,极大地推动了我国理论物理与生命科学、化学和材料科学的交叉研究,培养了一支可以开展相关交叉学科研究的队伍,找到了更多的进入生命科学、化学、材料科学和信息科学的切入点,为今后我国理论物理与生命科学、化学和材料科学的交叉研究和创新打下了良好的基础。

以理论与生物科学的交叉为例。南京大学王炜课题组的研究工作和队伍建设是一个很好的例证。南京大学物理系是国内较早开展与生物学交叉课题研究的单位之一,在开展了一段时间的研究工作后,他们尝试到了从事交叉课题研究的困难和艰辛,处在是否要全力向与生物学交叉的犹豫时刻。此时正好是研究计划实施的初期,研究计划给予了最大程度的支持,由当时专家组组长苏肇冰院士和专家组协调设置了一个国内多个单位组成的有关蛋白质系统的物理特性和动力学的课题,邀请了包括生物学家王志新院士等专家参加和指导,并由王炜教授担任课题负责人。他们围绕着蛋白质系统的动力学和物理特性,用凝聚态物理、统计物理和计算物理学的概念和方法先后开展了蛋白质折叠动力学的大规模计算机模拟研究和蛋白质序列复杂性的简化系列研究。在折叠动力学方面,他们基于蛋白质拓扑结构特性构建了简化 Go 模型,对几个典型蛋白的折叠动力学和机制进行了系统的研究,理论模拟和机制探讨很好地解释多个实验结果和澄清了几个不同结果之间的争论。在全原子水平上,结合最新发展模拟方法,首次对 beta 发卡的折叠全过程进行了模拟;发展了一个描述金属离子与蛋白质相互作用的理论模型,并首次用于锌指蛋白的研究,为模拟金属离子调控的蛋白质动力学过程提供了方法。在蛋白质系统复杂性简化研究中,基于氨基酸之间的不同相互作用势矩阵和氨基酸之间的相似性,讨论了相应的氨基酸分组结果的有效性,刻画了 N-10 的台阶与蛋白质系统的复杂度的关联特性;对自然界应存在有多少种折叠结构类 fold 数目以及其分布进行了统计估计。这些成果,大都发表在与生物学相关的重要杂志如 *JACS*, *MB* 和 *Proteins* 上,得到了同行专家的赞扬和认同,有关复杂性简化和折叠动力学的成果多次在综述论文中被长段评述。如他们得到的氨基酸简化分组表被引用 60 余次,直接用到了蛋白质序列比对中。金属离子调控的蛋白质折叠工作被科学新闻网站 Verticalnews.com 在 2008 的新闻中评价为“Research conducted at Nanjing University has updated our knowledge about Chemical research”。他们的研究队伍从最初的 1 名教授已发展到了由 2 名教授、3 名副教授和一名讲师组成的从事生物物理研究的课题组,其中 2 名青年教师进入教育部新世纪人才培养计划,培养了 12 名博士研究生,课题组已成为国内从事与生物交叉课题研究的主要单位之一,在国内外具有良好的学术影

响。王炜教授在 2007 年作为首席科学家成功申请了科技部 973 项目,还因在蛋白质方面研究的出色成果被著名杂志 *Proteins* 聘为编辑。目前,他的课题组除了理论研究外,还建立了一个从事有关凝聚态物理与生物交叉课题实验研究的实验室。

2.4 推动了热点领域的研究,建立了有影响力的理论模型,展示了我国学者在国际热点方向上的竞争能力

1998 年发现宇宙加速膨胀以来,现代宇宙学已经成为极其活跃的前沿研究领域,天体物理和理论物理的重要交叉课题。例如,1998 年宇宙加速膨胀的发现被世界著名杂志 *Science* 列为当年的十大科技进展之首;2003 年比 COBE 卫星更高精度的 WMAP 卫星的宇宙微波背景测量进一步确认宇宙中暗能量的存在又一次被 *Science* 杂志评为当年的十大科技进展之首。越来越多和越来越精确的宇宙学数据的获得意味着精确宇宙学时代的到来,目前,世界各国在宇宙学的研究上投入了大量的人力和物力,如欧洲大型强子对撞机(LHC)已于今年投入运行,比 WMAP 卫星更高精度的 Planck 卫星于 2009 年发射。伴随着国际上现代宇宙学研究这一新的热点领域,重大研究计划及时积极部署,面对国际挑战,在研究计划 8 年的执行期间,从小到大,从弱到强,建立了一支具有国际竞争力的宇宙学研究队伍:在 2000 年以前,我国只在个别研究单位有零星个人从事宇宙学研究。在重大研究计划的部署下,目前在中国科学院几个研究所和国内许多高校已经形成了一支以中青年为主的、具有国际竞争力的、非常活跃的创新研究队伍。在宇宙学的相关课题上开展了富有成效的研究,取得了许多具有国际影响力的研究成果,在国际宇宙学研究舞台上占有了一席之地。这支研究队伍面对激烈的国际竞争,大胆作为,勇于创新,在国际上提出富有创新思想的暗能量模型,吸引了国际上大量的后续研究。

表征暗能量的性质的是其状态参数 $w = p/\rho$, 这里 p 是暗能量的压强, ρ 是其能量密度。通过拟合天文观测数据,决定暗能量的状态参数是暗能量研究的一个重要方面。中国科学院高能物理研究所张新民课题组发现暗能量的状态方程有跨过 -1 的可能性,并提出了一个 Quintom 暗能量模型来解释这一现象,Quintom 暗能量模型具有状态参数越过 -1 的性质,满足现有的观测数据。暗能量状态参数小于 -1 或跨过 -1 对现代物理的基础提出了严峻的挑战。所以论文发表之后在国内外掀起了研究状态

参数越过-1的暗能量模型的热潮。暗能量问题是与宇宙学常数和量子引力紧密联系的一个问题。基于量子引力的基本原理:全息原理,理论所李森研究员提出了一个所谓的全息暗能量模型。这个模型不仅可以解释观测结果,而且只有一个参数。该模型的最大特点是预言了暗能量状态方程参数可以越过-1,与很多数据分析的结果一致。最近的研究表明,相较其他模型,全息暗能量的贝叶斯证据是正的,说明该模型的优越性。另外,这个模型联合暴涨宇宙论可以解决宇宙巧合问题,并给出微波背景辐射谱在大尺度上的压低。暗能量问题的解决不仅依赖于越来越精确的宇宙学参数的测量,而且要求对描述自然的基本理论的深入研究。中国科学院理论物理研究所蔡荣根研究员等在膜世界图像中,发现几何效应可以产生跨过状态参数-1的有效暗能量模型;提出了一个状态参数可以跨过-1,没有大撕裂命运的 hessence 模型;暗物质和暗能量的相互作用可以减弱宇宙学巧合性问题;结合广义相对论和量子力学测不准原理,提出了一个以宇宙年龄为测度的暗能量模型。这些暗能量模型在国际上都具有相当大的影响,引起了国际同行的大量后续研究,相关论文都有很高的引用,极大地推动了国际上暗能量的研究。

又如2003年底,Cachazo, Svrcek, Witten在Witten结果的启发下提出了与Feynman图规则类似却是建立在所谓MHV(最大螺旋度破坏)顶角上的新的计算规则(CSW规则)。在提出CSW规则仅一个星期,理论所朱传界就用这些规则严格地导出了所有的Googly散射振幅,这极大地使人们坚信CSW规则是正确的。他们在2004年发表在JHEP上的3篇论文就QCD单圈图多粒子散射振幅的计算问题,解决了计算中最困难的部分有理部分问题。他们用传统的费曼图方法,利用递推关系,系统地发展了一套直接计算有理部分的方法,利用这一方法第一次完整地计算QCD δ -粒子的单圈图散射振幅。其中参加这一工作的博士生也因这方面的工作获2008年全国百篇优秀博士论文。

2.5 成长了一批优秀学术带头人,做出在国际上有重大影响的工作

一批优秀的学术带头人的成长为实现我国理论物理研究的强国地位这一战略目标奠定了良好的基础。

(1) 强烈的电-声子耦合和电子关联效应对理论描述有机材料的性能提出了重要挑战。中国科学

院化学研究所帅志刚发展了激发态的无辐射跃迁理论,从路径积分形式的振动关联函数出发,彻底抛弃了沿用了40多年、只适用于2-3个原子体系的“提升模”近似,得到了一个完全解析的、更普遍的无辐射跃迁率计算公式,朝着定量预测分子荧光效率迈进了一大步,并通过激子-振动耦合的第一性原理计算,提出了解释聚集诱导发光的一种可能机制。他发展了强电-声子耦合的电荷传输理论,用于预测有机传输材料的载流子迁移率,提出了简便、可靠的电子耦合项计算方法,发展了基于电荷转移理论结合无规行走扩散数值模拟的迁移计算方法,定量地给出了电荷迁移率与分子共轭长度和分子堆积的关系。他发展了关联电子体系激发态结构理论与非线性响应理论,为有机光子材料设计提供了计算工具,在一系列高质量论文的基础上应邀撰写专论,该文发表后已经产生了重要影响。2008年11月,Wiley-VCH *Macromolecular* 系列杂志从过去18个月所发表的约1200篇论文挑选了9篇最佳论文,该专论是其中之一。特别是他在近6年取得了一系列重要进展,得到国际上学术界和工业界的广泛关注。帅志刚于2008年当选为国际量子分子科学研究院院士,是1981年唐敖庆教授当选以来,中国的第二位入选者,并以leader in the field身份接受为Fellow of Royal Society of Chemistry (FRSC)。

(2) 为了解决强关联材料的电子结构计算问题,多年的应用实践表明越来越需要一种既快速又精确的电子结构计算方法,以用于复杂的实际强关联材料的第一性原理计算研究。从2006年开始,中国科学院物理研究所的方忠和戴希研究员在这方面进行了艰苦的努力,终于在2007年底成功地提出了一种全新的针对强关联材料的第一性原理计算方法,即LDA+Gutzwiller方法。在这一计算方法中,用Gutzwiller变分法来有效地处理电子之间的强关联效应,因此对比LDA+DMFT方法,既保留了相当高的计算精度,又极大地提高了计算速度,使之能应用于许多实际体系的计算。同时从最基本的变分原理出发,用类似Kohn-Sham的方法构造“参考哈密顿量”,使得他们提出的Gutzwiller变分波函数,是这个“参考哈密顿量”的真实基态。而在这一变分框架底下,对交换关联势做相应的近似,即得到LDA+Gutzwiller方法。严格基于变分原理的推导过程的完成,意味着LDA+Gutzwiller方法有了一个更加坚实的理论基础,同时也为今后可能的改进明确了方向。在完成了解析推导的基础上,成功地

实现这一方法的程序化,并与他们拥有完全知识产权的BSTATE 计算软件包实现了完美的结合。LDA+Gutzwiller 方法提出后,他们已经把它应用于各类过渡金属化合物材料的计算研究之中。其中,对于铁、钴、镍的计算表明,应用了 LDA + Gutzwiller 方法之后,可以将计算精度提高一个数量级以上。而对 NaCoO₂ 系统的研究则表明,用 LDA 计算所得到的结果存在着很大的定性错误,其基态相图存在着很大的铁磁区域,并且在 30% 掺杂的样品中的费米面也与实验观测极不相符。应用了 LDA+Gutzwiller 方法后,对这类材料进行了仔细地研究,其结果完全解决了早先 LDA 计算与实验不符的问题,在 30% 掺杂区近得到了正确的基态和费米面的构型。这一工作在 *PRL* 101,066403(2008) 发表之后,得到了许多国际同行的好评和认可。他们计划在今后的两年内,把它发展成为各种功能齐全的,针对强关联材料的计算方法。其中将包括:表面结构优化、强关联体系在外场驱动下的线性响应、晶格动力学性质计算等。

(3) 近 5 年,中国科学院理论物理研究所孙昌璞及其研究小组同时结合国际上的新动向,积极开展研究,主要工作集中在量子开系统理论和固体系统、原子系综和单光子系统的量子信息过程的基础物理问题。由于过去在固体量子计算物理基础方面的艰辛探索和量子物理基本问题方面的多年研究工作积累,他们厚积薄发,在量子相变增强量子退相干、诱导规范场分离手征分子、循环超导人工原子和纳米机械冷却以及量子信息的传输和存贮等方面取得了一批系统性强、具有明显创新性的研究成果,在国际上有一定影响。特别是近 5 年共发表论文 80 篇,其中 10 篇发表在 *PRL*。总引用超过 1200 次。有 3 项工作的理论预言得到实验的直接证实,其中之一作为一项主要贡献获得国家自然科学奖二等奖(2008 年)。他的研究生获得全国优秀博士学位论文(1 项)、中国科学院院长特别奖(1 项)和中国科学院优秀博士论文(3 项)。

2.6 研究队伍、人才培养、学术交流与合作及资源数据共享均取得显著进展

在完成高质量研究成果的同时,明显地增强了研究队伍的创新能力和竞争能力。这批优秀的学术带头人包括国家杰出青年科学基金获得者、教育部长江学者、特聘教授以及中国科学院“百人计划”科学家等。几年来理论物理领域在中国科学院若干研究所和国内许多高校已经成长了一批学术带头人,

他们中的一些人已经能够在国际一些重要的或大型学术会议上做几十分钟的邀请报告,产生了重要的国际影响,为下一战略目标:在众多领域、最权威的国际会议上占领讲台、为实现我国理论物理研究的强国地位这一战略目标奠定了良好的基础。

国际合作和学术交流是提高国际竞争能力的重要途径,重大研究计划从一开始就十分重视,众多课题组通过国际合作和学术交流做出了具有国际水平的研究成果。举例说明:

(1) 针对高分子电致发光内量子效率是否能够超过 25% 自旋统计极限这一国际广泛关注的问题,帅志刚教授与比利时科学家合作,在以前考虑电子耦合的基础上,进一步考虑了电荷复合过程中驱动力的自旋依赖性,明确地从理论上指出可以 25% 的极限,得到多家国际电子工业著名网站和新闻期刊报道;

(2) 有机固体和聚合物中的电子过程与材料设计、分子尺度的电子器件的理论研究依赖于量子耗散理论的进展。针对有机分子光致变色现象,复旦大学吴长勤教授与加州大学伯克利分校李东海教授合作,研究耗散的环境对这一现象的影响。结果表明,由于分子与耗散环境的耦合,可以存在两种情况。其一是环境对分子的影响是微小的,通常可以通过微扰论来处理,因而有机分子仍然具有光致结构异化的功能;二是环境和分子耦合很强,此时微扰论失效,环境定性改变分子的行为,有机分子 Azobenzene 不再具有光致结构异化的功能。这一结果与最近的实验事实相一致。进一步,他们给出检验这一机制的实验—光吸收谱在上述两种情况具有定性不同的结构;

(3) 复旦大学龚新高教授与美国再生能源实验室魏苏淮博士建立广泛的合作关系,不仅在共同开展材料设计取得了丰富的成果,共同在 *PRL* 和其他重要杂志上发表论文多篇,同时以此为基础获得了国家外专局和教育部共同支持的 111 引智计划的支持;

(4) 本计划第一板块的研究人员与美国 BNL 国家实验室、德国 GSI、日本东京大学等国际研究机构有紧密合作关系;与国际上同领域的著名专家合作,使研究工作上新台阶,特别突出的是,王恩科与美国 LBNL 的理论专家王新年博士紧密合作,研究成果多次发表在 *PRL*,受到国际同行高度重视。还与兰州近代物理研究所即将进行的有关核物质性质的实验有密切合作。一直倡议在兰州冷却储存环(CSR)上进行高密度核物理工作,并作了相应的理论

研究；

(5) 张广铭和向涛对二维量子自旋 $1/2$ 的多体系统,即可用于拓扑量子计算的 Kitaev 模型进行了系统的理论研究,得到了重要的结果。这一结果立即得到美国加州大学 Berkeley 分校李东海教授的高度重视,马上与他们合作,在这一工作基础上,建立关于二维超导的缺陷态、Kitaev 模型、分数量子 Hall 效应、和聚乙炔的一维畴壁之间的自然联系；

(6) 王伟教授领导的“蛋白质序列分析、结构预测和折叠动力学及其相关问题”课题集成了南京大学、天津大学、华中科技大学、中国科学院生物物理所和理论物理所等 7 位研究人员所组成的课题群体等。

为进一步推动学术交流,我们按照 9 个研究方向形成了更大规模的项目群,即把同一个研究方向上的各种项目联系起来。不同的项目既有共同的研究方向,又有独立的研究课题。在宽松的学术氛围中增强各课题内和跨课题的学术交流,进行研究思想的碰撞。如:“强关联多电子系统的理论研究”的“领域研究群体”是由翁征宇、陈鸿、王玉鹏、王孝群等领导的几个较大的课题群体、再联合其他独立的研究组成员组成的。

总之,研究计划构建了国内、外学术交流平台,创造了良好的学术氛围,促进了 9 个前沿领域的研究工作的进展,进一步推动九个前沿领域“研究群体”集合成为一个大的“创新研究群体”。

3 存在的主要问题

3.1 现有研究队伍的规模和现状满足不了学科发展的需要,更满足不了国家战略发展的需求

在本重大研究计划的主导下,我国理论物理学工作者积极参与国际竞争,在竞争中深深体会到我国在理论物理研究与欧美和日本相比,无论是在人力的投入和基金的支持方面都有很大的差距。我国理论物理研究主要依赖于国家自然科学基金的支持。在选题的前瞻性方面的经验和物理思想的积累不足,学科的布局不够均衡。现有研究队伍的规模和现状满足不了学科发展的需要,更满足不了国家战略发展的需求。理论物理研究方面,总体而言美国处于领先地位,这与美国在理论物理研究的长年积累和务实的追求精神是分不开的。但欧洲和日本也各有所长,有很强的竞争力。特别是日本,近年来在新材料的探索和相关的物理问题研究方面发展极其迅速,引起广泛关注。

3.2 对重大研究计划结束后如何以更有效的方式资助深入思考不够

“研究计划”经过 8 年的实施,做出了一批优秀成果,呈现了一个较好的发展势头,其相关论文也在国际上产生了一定的影响,为推动我国理论物理及相关交叉学科的研究提高到一个新的水平做了重要贡献。回顾 8 年的实施,通过“研究计划”所提供的基础理论研究平台保持了一支与好几个学科有实质性交叉的理论研究队伍,这些高水平的基础理论骨干研究人员获得了一个较为稳定的研究环境,在与不同学科的交叉、碰撞中,成为产生源头创新的根据地;在此平台的影响下,使一些人自然地转到一些交叉学科的前沿领域,成为那些学科领域的开拓者。我们认为,理论物理队伍对持久地服务于国家目标、建立新学科、开拓新的交叉领域、为其他学科培养和输送优秀理论物理人才等方面是十分重要的。同时理论物理与其他学科交叉的融合,也是理论物理能不断地获得源头创新思想、长久兴旺发达的必须遵从的途径。为此我们必须思考后重大研究计划时期的模式,怎样推动和组织我国理论物理研究思想的交流、跨学科之间的交叉、理论和实验的融合?对此缺乏深入思考。

此外,研究计划管理要朝营造宽松环境努力。从设置研究计划一开始就希望为理论物理研究营造宽松环境和氛围,但目前还很不够,原因是多方面的。

我国作为一个世界大国,应对人类做出更大贡献。从国家的战略需求来看,在理论科学研究领域内提高科技原始创新能力和研究水平是我国科技步入先进国家行列的重要方面,关键是抓紧时机建立一支国际一流的理论物理人才的科学家队伍。理论科学家队伍还会不断向高新技术、国防科技、甚至金融研究输送善于开拓、富于独创的人才。

理论物理研究面很广,它不同于应用性强的研究,很难断言在哪一个领域、哪一个问题上会有所突破。过去 8 年选择了 9 个前沿领域资助,研究计划资助强度偏弱,这是本研究计划的不足之处。

我们完全有可能在未来 5—10 年,特别是那些与实验研究密切结合的理论研究方面取得重要进展,其结果不仅解释重要实验而且做出重要的理论预言指导(国内、外)实验研究工作获得国际公认,在国际竞争中占有一席之地。这样就有可能在这些领域内处于国际上领先地位,实现跨越式发展。

REVIEW OF THE ACHIEVEMENTS OF MAJOR PROGRAM ON "SOME FRONTIER
ISSUES ON THEORETICAL PHYSICS AND ITS INTERDISCIPLINARY SCIENCE"
SUPPORTED BY NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

Ouyang Zhongcan¹ Wan Meixiang² Chen Runsheng³ Zhao Guangda⁴
Tao Ruibao⁵ Huang Tao⁶ Mei Liangmo⁷ Peng Kunchi⁸

(1 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;

2 Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

3 Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

4 School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 5 School of Physics, Fudan University, Shanghai 200433;

6 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

7 School of Physics, Shandong University, Jinan 250100;

8 School of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006)

Abstract This paper reviews the 8-year implementation and achievements of a major program on "Some frontier issues on theoretical physics and its interdisciplinary science" supported by National Natural Science Foundation of China. The innovative achievements made by the participants and their contributions to resolving the core scientific issues are also addressed.

Key words major project, theoretical physics, interdisciplinary science, the original innovation, international competitiveness

· 资料 · 信息 ·

国家自然科学基金重大项目 “禽流感关键基础科学问题研究”通过结题验收

国家自然科学基金重大项目“禽流感关键基础科学问题研究”通过了结题验收。该项目在禽流感病毒分子流行病学、病毒蛋白结构与功能、感染机制与免疫应答、禽流感病毒感染人的特点与传播途径等方面都取得了原创性的结果，圆满完成了计划任务，为进一步开展流感基础研究、流感疫苗的研制、药物开发提供了新的思路，受到专家组的好评，获得了特优的综合评价。

历经4年研究，课题组阐明了近年来流感病毒在多种动物和人中的分子流行病学特征与进化变异规律；解析了H5N1病毒RNA聚合酶部分亚基的结构，发现了PA的新功能，为抗流感病毒药物设计提供了潜在的新靶点；发现了流感病毒NS1蛋白在调控PKR信号通路中的作用；首次报道了流感病毒感染引起人肺上皮细胞自噬，发现自噬抑制剂可以

抑制流感病毒的复制；鉴定了第一个具生物学功能的H5N1病毒CTL表位，为进一步研究病毒感染与宿主细胞免疫应答、生物标记诊断与新型疫苗研发提供了新的信息；基于病毒膜融合机制，设计和筛选出一种能抑制流感病毒膜融合的多肽抑制剂；发现了H5N1病毒可以通过胎盘进行母婴传播，人肠道细胞存在禽流感病毒 α -2,3半乳糖苷唾液酸受体。

通过项目的实施，课题组凝聚了国内跨学科领域的研究人才，形成了具有国际竞争力的团队，开展了与国内外同行的广泛交流与合作，多次组织相关国际会议，引起了国内外同行的关注。

(生命科学部 供稿)