



中山大学物理学学科百年发展史(1924—2024)*

王军, 赵福利

中山大学物理学院, 广东 广州 510275

摘要: 中山大学物理学学科与中山大学同龄, 至今已历一个世纪, 期间涌现出一大批杰出的教育家、科学家, 以及周誉侃、高兆兰、李华钟、郭硕鸿、莫党、张纯祥、张进修、余振新、罗蔚茵等一批物理学家及教学名师。经历了民国初期的以科学化人为核心的创系阶段、高校内迁的艰辛跋涉阶段、院系调整后面向国家专业人才培养分立学科发展阶段, 建立了相对完整的物理学学科布局。拥有超快速激光光谱学国家重点实验室、国家首批物理学博士点等。21 世纪以来, 物理学发展壮大, 孵化出中法核工程与技术学院、微电子学院、材料科学与工程学院等。2015 年后, 逐步形成物理学科三校区同质办学错位发展布局。中山大学物理学和光电信息科学与工程专业均为国家一流专业, 成为国家重要的拔尖创新人才培养基地。中山大学天琴中心、广东省基础学科研究中心等专业研究机构和高能直接几何非弹性中子散射飞行时间谱仪等大型设备共同支撑中山大学物理学学科在理论物理、凝聚态物理、光学、等离子体物理、天文学等学科方向为我国科学事业发展贡献力量。

关键词: 物理学; 学科建设; 中山大学

中图分类号: G649.29 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)06-0012-21

Centennial history of physics discipline at Sun Yat-sen University(1924-2024)

WANG Jun, ZHAO Fuli

School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: The physics department of Sun Yat-sen University has been constructed for 100 years since Sun Yat-sen University (SYSU) was established by Dr. Sun Yat-sen in 1924. During this period, a number of outstanding educators and scientists have emerged, such as Zhou Yukan, Gao Zhaolan, Li Huazhong, Guo Shuohong, Mo Dang, Zhang Chunxiang, Zhang Jinxiu, Yu Zhenxin, and Luo Weiyin. Physics in SYSU, has experienced the scientific and human-centered department-building stage at first, the hardships of university relocation between 1938 and 1945, and the development of sub-disciplines since 1952 leading to a relatively complete layout of physics disciplines and a series of honors such as the State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy and the first batch of doctoral programs in physics in China. Since the 21st century, School of Physics Science and Engineering in SYSU hatched out Institut Franco-Chinois de l'Energie Nucléaire, School of Microelectronics and School of Materials Science and Engineering. After 2015, the distribution of homogeneous and alienated schools in the three campuses of the physics has been gradually formed. The majors of physics and photoelectric information science and engineering in Sun Yat-sen University have become

* 收稿日期: 2024-10-08

录用日期: 2024-10-12

网络首发日期: 2024-10-22

作者简介: 王军(1964年生), 女; 研究方向: 历史学;

E-mail: wangjun@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 赵福利(1969年生), 女; 研究方向: 超快激光光谱、高等教育;

E-mail: stszfl@mail.sysu.edu.cn



ZR20240297



ZR20240297

the national first-class majors. Professional research institutions such as Tianqin Center for gravitational physics and Guangdong Basic Discipline Center, and large-scale facilities such as high-energy direct geometry inelastic neutron scattering time-of-flight spectrometer jointly support to contribute to the development of scientific undertakings in theoretical physics, condensed matter, optics, plasma physics, astronomy and other disciplines in SYSU.

Key words: physics; discipline construction; Sun Yat-sen University

中山大学物理学学科始建于1924年创校之初,1952年并岭南大学物理学系,1981年恢复理论物理和光学博士点,1984年建立首批国家重点实验室之一——“超快速激光光谱学国家重点实验室”,1985年成立国家首批博士后流动站之一——“物理学博士后流动站”,1993年获批准建设国家物理学人才培养基地,1998年物理学学科成为首批博士、硕士学位授予权一级学科,有着近百年的历史积淀和文化遗产。周誉侃、高兆兰、李华钟、郭硕鸿、莫党、张纯祥、张进修、余振新、罗蔚茵等一批物理学家及教学名师都在此耕耘过(增强出版:附图1)。2015年12月,按照学校学科发展布局,依托物理学学科成立物理学院。同年,在珠海校区成立物理与天文学院,2021年在深圳校区成立理学院。至此,中山大学物理学一级学科分布广州、珠海、深圳三个校区,形成同质办学错位发展的格局。

1 中山大学物理学学科发展概述

1.1 国立广东大学至国立中山大学阶段(1924—1949)

1924年成立广东大学(后更名为中山大学),建校时设物理学系。柳金田、黄巽、朱物华、朱志涤、夏敬农、钟盛标等曾在此工作,1932年中国物理学会成立时成为首批会员。到30年代,中山大学物理学系已有普通物理、磁电学、光学、热学、应用电学、无线电等实验室,各种仪器千多种。朱物华对电路的研究、钟盛标对晶体光学的研究等在国内知名。抗日战争至1949年前,因缺乏和平环境,物理学研究受到影响。中华人民共和国成立后,中山大学物理学研究取得巨大进步。

1.2 中山大学物理学系阶段(1949—1995)

1956年,中共中央发出“向科学进军”号召,因院系调整而一度停滞的物理学研究工作得到恢复和发展。这期间,主要工作还在于培训人员、组织力量、建设实验室,研究成果不多,研究工作偏重应用性课题。物理学系的研究主要有:高兆兰的光谱研究,周誉侃的固体发光研究,彭旭虎的X光分析,朱志沂的磁学材料研究,夏敬农的物理教学,卢文的理论物理研究。王子辅在广东最早开设量子力学课程。

1962—1966年,物理学系在基本粒子理论、固体物理方面的研究引起国内外注意,激光研究开始起步。“文革”开始后,科研工作几乎完全停滞,到70年代初逐渐复苏,开始研制气体激光器等,并恢复粒子理论研究。

1974年,陈嘉言等开始探测引力波。1976年以后,物理学系拥有了一支理论物理研究队伍。在固体物理和激光方面,开展了多方面研究。1978年,中山大学建立引力物理研究室,这是当时中国仅有的两个引力物理实验室之一。教育部与国家

科委拨款近100万元,支持中山大学进行引力波探测实验。同年,中山大学激光与光谱学研究室成立,在高兆兰指导下,该研究室开展超短激光脉冲与超快速光谱学研究,在国内处于领先地位。此外,物理学系的“规范场经典理论”“氮分子激光器”和“脉冲式可调谐染料激光器”等研究,在国内享有一定声誉,5项成果获1978年全国科学大会奖。

1979年后,中山大学与国外及港澳物理界的交流大大加强,一些物理相关的国际学术会议在广州召开。1980年,在从化举行了广州粒子物理理论讨论会(增强出版:附图2),诺贝尔奖获得者杨振宁、李政道,中国著名物理学家周培源、钱三强等参加会议。1983年,在广州举行了国际激光会议,国内外学者近300人参加。1987年,中山大学和美国斯坦福大学、意大利罗马大学在广州共同主办国际引力物理实验讨论会,来自15个国家的100余名学者参加。

1981—1987年,中山大学物理学研究取得长足发展,获得众多成果,其中2项获国家自然科学奖三等奖。1984年,中山大学建立超快速激光光谱学实验室(国家重点实验室)(增强出版:附图3)。

从总体看,20世纪80年代,中山大学物理学研究属国内中上水平,拥有李华钟、郭硕鸿、鲍诚光、高兆兰、余振新、莫党、李景德、张进修、张纯祥、林贻堃等一批国内知名的物理学专家。在理论物理、光学、固体物理、半导体、金属物理、粒子物理与原子核物理、无线电物理等方向积累了丰硕的成果。

1.3 物理科学与工程技术学院阶段(1996—2015)

随着国家学科布局调整,1996年,中山大学将物理学系、力学系和超快速激光光谱学国家重点实验室整合为物理科学与工程技术学院(简称理工学院),旨在促进理工协调发展。该阶段,理工学院在凝聚态物理、材料物理与化学、光学、粒子物理与原子核物理等领域做出了显著的成果,许宁生、杨国伟、李宝军、沈培康等一批海内外优秀学者获得国家自然科学奖二等奖。学院在微电子学、材料科学与工程、核科学与技术、光学工程等一级学科做出了扎实的积累,奠定了孕育新学科的基础。

1.4 新发展阶段(2015—2024)

2015年12月,按照学校学科发展布局,依托物理学学科成立物理学院,将理工学院的微电子学与固体电子学、材料物理与化学、光学工程等学科相关的部分人员分别调整至电子与信息工程学院、材料科学与工程学院。物理学院则包含凝聚态物理、理论物理、光学、粒子物理与原子核物理等二级学科以及太阳能和软物质两个研究方向。新的物理学院以物理学一级学科发展为核心,积极开展人才队伍建设和科研教学工作,学院国家级人才超过1/3,在高温超导等研究中获得

突出进展。2023年建立了全国首个高能直接几何非弹性中子散射飞行时间谱仪,并获批成为广东省唯一的物理学基础学科研究中心。

同年9月,珠海校区成立物理与天文学院,学院的物理学一级学科,主要研究方向包括引力物理、精密测量物理、原子分子物理、量子精密测量,以及空间科学和技术等。

2021年,在深圳校区成立理学院,重点开展粒子物理与原子核物理、理论物理、等离子体物理和光学4个学科方向建设,为粤港澳大湾区服务。

本文第2部分将从学科纵向发展演化呈现各二级学科/方向的发展。

2 中山大学物理学二级学科建设与发展

2.1 理论物理

2.1.1 粒子和场的理论 20世纪50年代后期至60年代,物理学系基本粒子研究组是国内最早开展粒子理论研究的小组之一,在弱作用理论和强作用的S矩阵解析性方面作了一定工作。郭硕鸿(1960)对 π 介子辐射衰变几率的计算,较早地注意到规范不变性的重要性,得出较严格可靠的结果,比当时国际上的同类计算前进了一步。李华钟(1965a, 1965b, 1964)关于费米子Regge极迹和 π 介子Regge极迹的工作较系统,且可用来讨论 π 介子形状因子。罗蓓玲(1962)提出了用不稳定靶进行实验的理论分析,研究用实验结果确定不稳定粒子间的互作用方法。这些工作都是当时国际研究的前沿课题,Regge极迹的研究独立于国外并同时发表(Khuri, 1963; Khuri et al., 1963)(增强出版:附图4)。

1973—1975年,李华钟、郭硕鸿和中国科学院冼鼎昌等合作研究了经典规范场的拓扑性质。他们还研究了N维欧氏空间的O(N)规范场。他们独立于国外的研究工作,提出用流形概念上下半球覆盖去表达磁单极势。这些工作获1982年国家自然科学三等奖(增强出版:附图5)(李华钟等, 1975, 1976, 1977a, 1977b, 1977c, 1977d, 1979a; 吴咏时等, 1978; Xian et al., 1979)。

1982—1985年,郭硕鸿等在纯格点规范场的相变问题和带费米子格点规范理论用变分法研究强子能谱,用解析方法得出了与国外用蒙特卡罗方法相一致的结果,而此解析方法具有独创性,清楚说明所用的近似程度(郭硕鸿, 1973, 1982; 郭硕鸿等, 1984; 胡连等, 1986)。

1985年以后,郭硕鸿、刘金明、陈启洲等较系统地研究格点规范理论的准确解和质量隙、弦张力等问题,以及应用格点规范理论计算弱作用矩阵元;郭硕鸿等提出了一个具有精确基态的格点哈密顿量,这在国际上首创的。郑维宏参加了精确基态的研究,并提出改进哈氏量形式;李志兵参加了弦张力和弱矩阵元研究,重作了蒙特卡罗模拟计算;郑波参加了关于格点许温格模型的准确解的研究,并提出了有准确基态的1+1维带费米子的格点哈密顿量;罗向前等(1988, 1989)参加了关于用格点规范理论计算弱作用矩阵元的工作。

1986—1988年,李华钟到美国作学术访问期间进行了贝

利相的研究工作:用黎曼联络去表达、求得贝利相;引入诱导规范场可以导致自旋同位旋转变;与美国犹他大学吴咏时合作研究了开路或非循环系统的拓扑相因子之可观察效应(此概念1990年为德国学者的实验所证实)(Wu et al., 1988)。以上工作都是首次提出,引起学者重视并被多次引用。

2.1.2 凝聚态理论和少体理论 20世纪80年代,鲍诚光在量子力学少体问题研究中发展了有关理论计算方法,特别是提出了一套通过分析并联密度研究少体系统内部运动形态的方法,在国际上首次对微观三体、四体系统的内部运动模式进行了较系统的研究,并对量子力学五体问题进行研究。研究成果受到国际同行较高的评价,研究论文被国际杂志审稿人评价为是对这一领域的重要贡献。他还撰写并编辑《少体方法原理和应用》一书。

在原子结构方面,鲍诚光引进了分波分析方法并应用于2电子、3电子和4电子原子系统,提供了“能态的分类”的坚实基础(鲍诚光, 1973, 1980; 朱熙泉等, 1980; 卢世琪等, 1981)。鲍诚光与北京大学合作,研究了核子配对现象,以便从更直观的角度去研究一对壳外核子间的关联。研究论文《奇偶波干涉对核子关联的影响》发表在《高能物理与核物理》1988年第3期(鲍诚光等, 1988)。

鲍诚光等完成的项目多次获得奖项,如:“微观相互作用玻色子模型与多体力”项目获1987年中国科学院科技进步奖三等奖;“三体至N体泰米系数和超球谐变换系数的计算(理论方法和通用计算程序)”项目获1988年国家教委科技进步奖二等奖;“量子力学的少体问题”项目获得1992年国家教委科技进步奖甲类一等奖,1992年广东省自然科学三等奖,广东省高校科技进步奖二等奖;“量子力学系统中的对称性效应”项目获2000年中国高校自然科学奖二等奖,2002年,获得广东省科学技术奖一等奖(增强出版:附图6)。

20世纪80年代初开始,周义昌等与暨南大学合作,研究临界点附近的相变行为以及孤子理论,取得一定成果,1982年对标量QED的有效势给出一种较简单的泛函算法,在单圈近似与国外结果一致(陈宗蕴等, 1985)。1983年,周义昌和刘金明应用这种泛函算法于超导电理论。

2.2 光学

2.2.1 光谱学、激光学和非线性光学 1954年,高兆兰等在中山大学创办光学专门化,组织并开展了原子和分子光谱学的教学与研究(图1),建立原子发射光谱及紫外-可见区分子吸收光谱实验室。1964年,增加红外光谱学实验室,开展联合散射分子光谱分析和联合散射基本参数测量,以及氨基化合物的电子吸收光谱研究、有机分子红外振转光谱及分子结构分析等工作,为后来实验室研制成功HCN远红外(亚毫米波THz波段)激光仪奠定了基础。

1959年,高兆兰开始发射光谱定量分析的光电方法研究。20世纪60年代初期,她在国内率先开展光谱定量分析的光电方法以及拉曼谱线退偏度的测定等研究,还开展CuO晶体的激子光谱及红宝石晶体的能级结构与光谱的研究;1962年,建立红外光谱学研究实验室,开展有机分子红外振转光谱及分子结构分析工作(增强出版:附表1~3)。

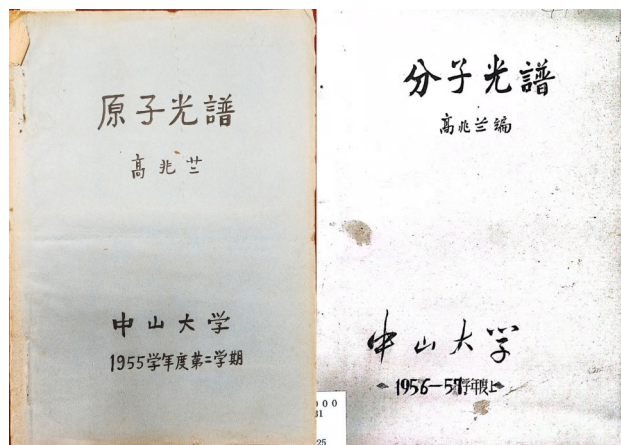


图1 《原子光谱》与《分子光谱》讲义

1974年,方心东、林位株等用铈酸锂晶体制成光学参量振荡器。1977年,余振新、李庆行研制扫描F-P激光模谱分析装置,可以对激光输出的模谱进行直接的实时观测(余振新等,1981)。

1978年,中山大学开展受激拉曼散射的研究。梁振斌、谢沧等观测到串级受激拉曼效应(梁振斌等,1978)。1980年,李文冲、林位株、余振新采用温度补偿型声光调制器研制成功锁模型氩离子激光器,获得纳秒量级的激光脉冲输出(李文冲等,1980)。1981年,方心东、林位株、李耀棠等采用皮秒光闸荧光光谱技术和吸收光谱技术研究了四溴荧光素、四苯基吡吩等分子的弛豫过程与荧光寿命(林位株等,1983)。

1981—1983年,史隆培在美国加州大学伯克利分校从事液晶的非线性光学研究,他与H.Hsiung合作,在国际上首次观察到10 ns单脉冲激光感生液晶分子取向,在10 ns到10 s范围观测到液晶的响应及弛豫过程,并发现利用磁场预取向可使向列型液晶的非线性光学效应提高6个量级(Hsiung et al., 1984)。

1982年,余振新、汪河洲与罗允康等合作研制成功以“中山”编号命名为ZSO1、ZSO2、ZSO3、ZSO4的4种近紫外区激光新染料。1983年,余振新采用电致伸缩改变F-P腔长并引入光电反馈办法,实现了光学双稳、多稳、微分放大以及逻辑光门等功能。

1984年,黄祯启、余振新等采用光克尔开关技术、利用“光泵-探针”方法实现了皮秒量级的荧光动力学测量并研究了有机复杂分子的超快发光机制以及分子的快速取向弛豫过程(黄祯启,1983;余振新等,1984;高兆兰等,1984)。

1985年以后,中山大学超快速激光光谱实验室在皮秒、飞秒时间分辨光谱学和非线性光学领域开展了一系列研究。其中,余振新、彭文基关于分子J-聚集态的研究,李庆行等关于超短激光脉冲感应超连续光谱的研究,汪河洲、黄旭光等的超短脉冲激光微束作细胞外源基因导入,林位株、丘志仁、黄作柱等研制的对碰脉冲锁模(CPM)飞秒激光器,以及黄旭、马淑懿的激光生物效应等多项研究工作,均取得成果。

20世纪80年代,中山大学激光与光谱学研究室逐渐发展成为国内激光光谱学的一个重要研究基地,率先开展物理、化学以及生物学中超快速过程的皮秒光谱学研究。建立了光克

尔开关法、条纹照相机法、自相关法等一系列时间分辨光谱学技术装置,对各种复杂有机分子和吡啉类生物巨分子进行了吸收与荧光动力学观测。通过对分子受激弛豫过程的研究,可以探索许多发生在皮秒和飞秒尺度的自然界中的超快速瞬变现象。

2.2.2 光信息科学与技术 1958—1959年,高兆兰、李哲吟与广州光学仪器厂合作,研制成功仿KC-55大型石英摄谱仪,处于国内领先地位(增强出版:附图7)。1983年,陈健、林位株等研制成功一种简易式光学多道分析器,能够实时记录光谱和图像信息(陈健等,1985)。

1971年,陈嘉言、陶福臻、余振新等研制成功激光大屏幕电视,实现了 $2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 单色电视显示。史隆培等参加广东省“七五”攻关项目“电脑控制大屏幕彩色液晶显示”,发明了每一像素可变四色的液晶显示技术(1989年通过国家教委主持的鉴定,认为达到国际先进水平,同年,获广东省高校科技进步奖二等奖)(增强出版:附图8)。

1972年,成功拍摄了国内首批的动态全息照片。1980年,郭斯淦、郑顺旋等研究多曝光激光斑纹干涉术并用于测量力学材料蠕变、断裂等。1986年,李哲吟等研制成功计算机全息图片。

1976—1978年,李哲吟等(1978)研制成功光斑直径达 $0.7\ \mu\text{m}$ 的激光微束仪,1983年通过省级技术鉴定,认为达到国内先进水平。

2.2.3 激光技术研究 1964年,光学教研室研制成钹玻璃激光器,广东激光技术的研究从此开始。“文革”开始,研究工作停滞;1969年,重新起步。

从20世纪70年代起,中山大学先后制成了红宝石、氦氛、氮分子及染料等激光器件和固态激光材料、元件;同时,在激光准直、打孔,全息显示及检测,激光育种,激光在医学及生物工程等方面的应用,取得较显著成果。

1977年以后,中山大学开展激光技术基础研究。高兆兰率先提出“超快速时间分辨激光光谱及其应用”的研究方向,得到有关方面支持。1984年起,国家计划委员会、国家教育委员会在中山大学投资,建立超快速激光光谱学国家重点实验室,从国外引进各类超短脉冲激光器,配备了从 10^{-9} ~ 10^{-15} s的不同层次超短脉冲激光光源,波长覆盖紫外、可见和近红外区;同时还配备各种快速光讯号探测器,为开展光化学、光生物学的时间分辨光谱学研究提供了有利条件。实验室建成后,平均每年有10余篇论文在国际专业杂志或国际学术会议上发表。在超短超快激光领域处于国内领先地位。

2.2.4 激光器件研究

红宝石激光器。1966年,中山大学郑顺旋、梁振斌协助广州电线总厂研制广东第一台红宝石激光器。随后又协助广州机电研究所共同研制成功单次脉冲能量为4 J的红宝石激光器。

钹玻璃激光器。1971年,中山大学郑顺旋、梁振斌、郭斯淦等试制成功脉冲式钹玻璃激光器,输出能量为5 J。

YAG激光器。1978年,林位株等研制成功一台电光调Q的YAG激光器。

氩离子激光器。1971年,陈嘉言、符传扬、余振新、陶

福臻等试制成功广东第一台连续氩离子激光器,输出功率 1 W,并用于激光显示及通讯试验。1975 年,余振新等研制成功铜冷阴极脉冲氩离子激光器,重复频率为 30/s,输出功率 25 W,脉冲宽度 200 μ s,在国内属于高技术难度的项目。中山大学激光光谱学研究所一直长期坚持提高连续氩离子激光器的制作技术,保持小批量生产能力,以大大低于国际商品的价格,不断供应省内外的大学、医院和事业单位。1980 年,李文冲、余振新、林位株等研制成功一台温度补偿型声光调制主动锁模氩离子激光器,输出脉宽达皮秒量级。

氦氖激光器。1972 年,陈嘉言、余振新、陶福臻、符传扬等研制成功广东第一台氦氖激光器。随后,氦氖激光器的生产、应用迅速推向全省。1976 年,在全国质量评比会议上,中山大学和广州机床研究所分别研制的 250 mm 内腔氦氖激光器并列全国第 1 名。20 世纪 90 年代,郭斯淦教授主持的 He-Ne 激光器,具有先进的技术指标与制造流程,并形成了一定的产业规模,为中山大学科技成果的转换与创收做出了表率。

二氧化碳激光器。1972 年,陈嘉言、余振新、陶福臻、符传扬等研制成功广东第一台二氧化碳激光器。

氮分子激光器。1975 年,在高兆兰指导下,余振新、源永安等研制成功广东第一台氮分子激光器。这是全国最早制成的同类型激光器之一,1978 年,获全国科学大会奖。该成果后来被公认为是中国激光事业的开创性工作之一,被列入《中国激光史概要》一书。1979 年前后,中山大学生产了近 200 台氮分子激光器销往省内外,供有关单位用于农业育种试验和医疗、科研等。1982 年,邝赞枢、李庆行、源永安成功研制出大气压横向激励氮分子激光器,为氮分子激光器的推广应用创造了良好的条件。1981 年,高兆兰、余振新、汪河洲、罗允康等自行合成 ZS01、ZS02、ZS03、ZS04 四种新型染料,属于国际首创,用于近紫外区产生可调谐激光。1985 年,周达君、余振新、黄作柱、罗泰昭等研制出氩离子激光泵浦的连续染料激光器,输出连续功率 400 mW,波长在可见区连续调谐。1985—1987 年,汪河洲、黄楨启、余振新、高兆兰等继续研究固溶态染料激光物质,通过基质材料掺杂提高了激光转换效率和稳定性。

激光应用。1977 年,余振新、陶福臻、周达君等研制成功氮分子泵浦脉冲式可调谐染料激光器,是激光光谱学的重要光源,输出线宽可达 0.04 nm。用 3 种不同工作染料适当配合,可以产生“白色”激光,成果填补了国内空白,1978 年被选送参加全国科学大会展览并获奖。后来被公认为属于中国激光事业的开创性工作之一而列入《中国激光史概要》一书。

2.2.5 激光基础研究

1) 激光物理。1983 年,李先枢提出标量光波传播的矩阵理论,计算了光学无源谐振腔的各阶横模,并讨论了其计算精度。此方法与国外公认的计算方法比较,结果吻合,而此方法还可给出各阶横模场的行波场分布(李先枢,1982;李先枢等,1988;李哲吟等,1988)。此后,李先枢等计算了 673 个各类腔中 10 970 个横模的重要性质,研究论文发表在《物理学报》第 35 卷第 8 期,对相位共轭谐振腔中各横模特性的进

一步计算结果表明,用标量光波传播的矩阵理论计算无源光学谐振腔,可获得较高的精度及较快的计算速度,此为国内外首创,论文被美国《物理文摘》摘录。

2) 激光光谱。1977 年,高兆兰率先提出“超快速时间分辨激光光谱学及其应用”的研究方向,引起全国同行的密切注意。从那时起,中山大学在这一重要研究领域开展了一系列工作,一直处于全国领先地位。1978 年,郑顺旋、马莹莹、梁振斌、谢沧等开展受激拉曼散射研究。郑顺旋等提出应根据实验结果在理论模型的基础上,补充物质对激光吸收的色散,完善对实验结果的解释(梁振斌等,1978)。相关论文发表在《激光》和《物理》上,并被美国《物理文摘》摘录,记入《中国激光大事记》中。

1983 年,余振新、彭文基等研究 J 聚集态皮秒量级的快速荧光弛豫过程及温度效应,实验结果发表在 *Chemical Physics* 1983 年第 79 卷。1986 年,余振新、陈矩涛等进一步研究 J 聚集态光谱特性,提出了一个亚宏观有序集体振动模相变的理论模型,解释 DCI 染料奇异的光谱特性(理论模型发表在 *Chemical Physics*. 1990 年第 143 卷)。同年,李庆行等提出感应超连续概念,成功地解释不同频率光脉冲通过介质时产生的相互感应超连续现象。论文发表在 *Opt. Lett.* 1986 年第 11 卷。此后,作者进一步研究微微秒超连续光脉冲产生的机制,并首次实验测定微微秒连续光脉冲的时间分布。论文发表在 *Appl. Optics*. 1986 年第 25 卷。

罗泰昭、梁丽贞、付思镜的“激光光热光谱研究及其应用”,获 1990 年广东省高校科技进步奖二等奖。高兆兰、汪河洲、余振新的“激光染料的微微秒光谱学研究”,获 1991 年国家教委科学技术进步奖三等奖。

20 世纪 90 年代,以高兆兰教授为代表的中山大学光学学科团队,经过多年持续发展,在光学学科取得了令人瞩目的成就。余振新、李庆行、李文冲、林位株、郑顺旋、李先枢、周达君、郭斯淦、汪河洲等研究人员在高兆兰教授率领下确立了光学学科在国内的领先地位(图 2)。

汪河洲、赵福利、郑锡光等的大分子聚集态光谱与相干弛豫研究,余卫龙、李庆行等的光折变物理与技术研究,先后



图 2 高兆兰教授与团队成员
(左起:李伟良、黄作柱、黄楨启、余振新、高兆兰)

多次发表在物理学顶刊“物理评论快讯”(Wang et al., 1995; She et al., 1999, 2000),中山大学成为当时国内为数不多的连续在此刊物上发表论文的高校。

周建英教授受比利时科学院普利高津教授(诺贝尔物理学奖获得者)邀请参加在布鲁塞尔举办的索尔维科学会议,一定程度反映了当时中山大学光物理学在国际上的学术地位。

在学科方向的发展上,中山大学光学学科在国内率先开展了超短激光脉冲,超快过程,复杂分子与巨分子的超快激光光谱,相干控制,以及光场调控等方向的研究工作,积极组织并参与国内首批攀登计划与973计划项目。光场调控在近年来已经成为国内的研究热点与基金委重大研究计划,其起源来自于中山大学提出并承担的国家自然科学基金委员会的重点项目。一系列光学科研成果(1992—2000年)获得奖励。

2.2.6 建立超快速激光光谱学国家重点实验室 由于中山大学在激光光学方面的雄厚力量基础,1983年5月17日,教育部批准中山大学设立“激光光学与光谱学研究室”。

1983年12月7日,中山大学提出《关于开展“超短脉冲激光器及超短脉冲激光现象研究”的建议书》,建议将其列入教育部激光技术发展规划,组织全国相关高校协作攻关。

为加强激光光学与光谱学研究,国家计委与教育部科技司于1984年5月上旬通过了将中山大学“激光光学与光谱学研究室”列为国家重点科研机构的决定。教育部科技司于1984年6月18~19日在北京召开实验室建设方案论证会。张西水副司长、中山大学刘嵘副校长和高兆兰教授在会上讲话。论证会由中科院技术科学部主任王大珩教授和物理所张志三教授主持。会上听取了余振新和李文冲关于实验室建设情况的报告。经过严格答辩及论证,1984年7月,中山大学“激光光学与光谱学研究室”被国家计委和教育部正式批准创建国家重点实验室,实验室定名为“超快速激光光谱学国家重点实验室”(图3)。1984年9月,国家计委计划投资130万美元、总金额450万元人民币用以购置精密仪器和开展科研活动。这是我国首批建设的国家重点实验室之一,同期获得重点投资建设的院校全国只有5所(复旦大学、吉林大学、中山大学、南京大学和山东大学)。



图3 《南方日报》1984.09.11新闻

由于高兆兰教授的巨大学术成就,中山大学光学学科成为全国高校的前沿学科之一。

1986年10月,1600 m²的新实验大楼(激光楼)建成,实验室边安装仪器设备边投入研究工作。1987年9月,高兆兰教授和余振新教授主持的“复杂分子与巨分子系统的激光物理、光化学及光生物学过程的研究”项目被批准列为国家教

委重点科技项目。

经过3年建设,1987年9月实验室通过校级专家组验收;10月通过教育部专家组验收;1988年1月17~18日,国家计委委托教育部科技司副司长张西水主持召开专家验收评议会议进行国家级验收。验收过程中,专家们听取了高兆兰教授和余振新教授关于实验室筹备建设和工作情况汇报(增强出版:附图9),并对实验室进行实地考察和检查(增强出版:附图10)。

经认真讨论和评议,评审组一致认为:实验室近中期研究目标明确,实验室以超短激光脉冲与时间分辨光谱技术及其在物理、化学和生物学超快过程的应用研究为主攻方向,是物理、光化学和光生物学近年来十分活跃和卓有成效的研究领域,具有基础学科意义也具有广泛应用前景。实验室装备、技术及能力达到世界著名同类型实验室水平(图4)。



图4 评审组王大珩教授宣读评审意见,国家重点实验室通过国家级验收(1988年1月18日)

超快速激光光谱学实验室通过国家级验收并正式对外开放,实验室可进行的激光脉冲宽度已达千万亿分之一秒量级,是当时人工所能产生和控制的最短最快的探测信号,用来探测自然界许多超快瞬变过程,在现代科学技术的理论和应用上有重要意义。

1988年1月25日,高兆兰教授主持召开了中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室学术委员会第一次会议。1988年度教育部对实验室开放经费专项拨款20万元。1989年10月,学术委员会以通讯形式评审开放研究课题。中山大学超快速激光光谱学开放课题一直运行至1999年改组之前,为全国各领域超快相关研究提供了大量的实验支撑,也为中山大学超快物理培养了一批人才,至今仍活跃在超快研究领域(图5)。

2.2.7 新世纪光学学科研究发展和演化 面向新世纪的科技发展,中山大学光学学科一方面保持超快激光光谱研究和非线性光学探究,深入新材料的动力学机制研究;另一方面与重组的光电材料与技术国家重点实验室保持一致,研究向应用基础研究拓展,包括光子晶体、光通信器件物理、光子器件、光场调控、半导体照明等。

复杂分子动力学研究(汪河洲教授团队)。2002年,汪河



图5 国家重点实验室开放揭幕仪式研究人员合影

洲教授主持的《复杂分子与生物巨分子超快速激光光谱研究》项目获广东省科学技术奖二等奖,主要完成人:汪河洲、郑锡光、赵福利、张景民。莫党教授主持的《新材料偏圆光谱及光诱导吸收研究》获广东省科学技术奖三等奖。

光子研究(余卫龙教授团队)。中山大学光学材料的非线性研究一直是重点研究方向。2005年,余卫龙教授主持的《光折变空间孤子的研究》获教育部自然科学奖二等奖。2008年,余卫龙教授课题组的“透明介质中光动量的实验观察”工作入选“2008年度中国光学重要成果”。余卫龙教授在著名物理学期刊*Phys. Rev. Lett.*连续发表3篇论文,为孤子光通信和光操控做出了突出的创新性工作(She et al., 1999, 2000, 2008)。

纳米光子器件研究(李宝军教授团队)。2008年,李宝军教授课题组完成的“聚合物纳米光子器件”工作入选“2008中国光学重要成果”。2009年,李宝军教授课题组完成的《基于纳米线的动态可调折射率传感器和光耦合实验》工作入选“2009中国光学重要成果”。2011年,李宝军教授课题组完成的《基于聚合物纳米光纤的微纳全光彩色显示研究》工作入选“2011中国光学重要成果”。2013年,李宝军教授主持的《微纳结构与光子器件基础研究》项目,获广东省科学技术奖一等奖;同年荣获教育部创新团队。2015年,李宝军教授主持的《用于功能集成的微型化光子器件基础研究》项目获国家自然科学奖二等奖(增强出版:附图11)。

光子调控器件研究(王雪华教授团队)。2009年,王雪华教授作为“973”国家重大科学研究计划首席科学家,负责《固体系统中光与物质强耦合作用的量子调控研究》(量子调控领域)项目研究。王雪华教授领导的微纳光子学与量子光学研究团队基于量子光辐射控制理论,提出一种能克服光子侧向和背向泄漏并能极大提高光子前向出射的新型高效微纳射灯量子光源结构;但它的实验实现受制于三大核心微纳制备技术,难度极大:160 nm厚的量子点薄膜转移技术;精度小于10 nm的量子点光学精确定位技术;环形槽宽度制备精度小于5 nm的微纳制备技术。团队经10余年努力,拔丁抽楔,掌握并发展了上述3大核心技术,在国际上率先实现了“三高”量子纠缠光子对源。王雪华教授团队的“关键量子信息器件——‘三高’量子纠缠光源”研究成果,入选教育部“中

国高等学校十大科技进展”。王雪华教授团队的“A solid-state source of strongly entangled photon pairs with high brightness and indistinguishability”,入选“2019年度中国光学十大进展(基础研究类)”。王雪华教授研究团队的“高亮度轨道角动量单光子固态量子光源”入选“2021年度中国半导体十大研究进展”(增强出版:附图12)(Zhou et al., 2006; Wang et al., 2008; Liu et al., 2017; Li et al., 2023)。

拓扑光子晶体的研究(汪河洲教授团队、董建文教授团队)。中山大学是国内较早开展光子晶体研究的单位之一,汪河洲教授在自组装光子晶体方面开展了具有创新性的工作。董建文教授在中山大学率先开展了拓扑光子晶体研究,并进一步在超构光学与应用方面开展了系统性工作。2017年,董建文教授团队“能谷光子晶体中的赝自旋和拓扑调控”入选“2017年度中国光学十大进展(基础研究类)”。2021年,董建文教授成为中山大学首位教育部“高等学校科学研究优秀成果奖(科学技术)青年科学奖”获得者。董建文教授研究团队长期研究超构光学物理与应用,形成了拓扑光学物理、超构表面计算成像等方向。董建文教授研究团队于2017年首次提出能谷光子晶体中的赝自旋和拓扑调控,相关成果先后发表在*Nature Materials*, *Physical Review Letters*上,形成国际上早期的拓扑光学研究方向之一,受到了广泛的关注与引用(Chen et al., 2011, 2019, 2021; Dong et al., 2015; Fan et al., 2019; Wang et al., 2020; Qian et al., 2021; Zhao et al., 2021; Wang et al., 2022; Zhuang et al., 2024)。董建文教授研究团队经十余年努力,自主研发了面编码计算全息三维成像算法、大面积厘米超透镜、大面积纳米压印超表面等多种微纳光学技术(Zhang et al., 2023; Deng et al., 2022; Rao et al., 2024; Tang et al., 2024)。

光场调控和三维显示研究(周建英教授团队)。周建英教授,在21世纪初期致力于相干控制和三维显示研究。在突破显示技术限制和极端环境下取得了显著成果。其团队在国内率先提出了光场调控研究计划,并成功将调控原理应用到散射光学成像和超分辨光学成像领域。周建英团队开展的矢量光场超分辨技术实现了接近物理极限的光学分辨率,相关成果发表在《物理评论快报》上,题为“巧用点扩散函数实现高分辨远场光学显微镜”,入选“2014中国光学重要成果”,受到广泛的关注与引用。研究团队在超分辨大数值孔径光学透镜设计制造方面的成果发表在*Nano Letters*杂志上,获得2019年美国光学学会年度代表性成果(Zhang et al., 2017)。周建英教授研究团队提出并实现了新型直下式指向背光裸眼3D显示技术,其显示综合技术指标与显示效果达到了国际先进水平。所提出的新型裸眼3D照明理论与实现方法在*Progress in Electromagnetic Research*杂志上发表(Liang et al., 2018)。

2.3 凝聚态物理

2.3.1 金属物理 1956年,彭旭虎、杨鸿铿等开始研究X射线结构分析和金属腐蚀(图6)。

1960—1966年,李燮均等(1960, 1964)和陈飞达等(1959)研究了铝多晶形变后的内耗变化,并用直接观察法研究了形变前后锌中位错的分布;李修宏等(1965)用电阻法研

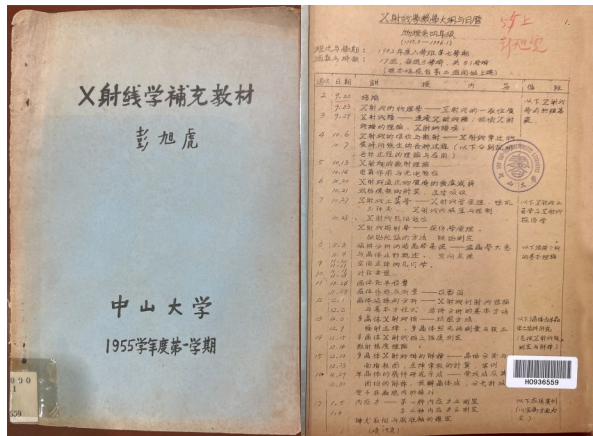


图6 彭旭虎《X射线学补充教材》讲义及教学大纲

究了位错与杂质的交互作用;张进修在中国科学院沈阳金属研究所和葛庭燧等合作,研究充分退火和部分冷加工铝铜合金中出现的非线性内耗—具有反常振幅内峰的温度内耗峰和时效内耗峰,并首次提出了位错弯结气团模型对所观测到的非线性内耗进行了解释。他们还研究了金属和合金在范性形变过程中的内耗,得到了范性形变过程中内耗与位错动力学参数及测量参数间的分析表达式(葛庭燧等,1965,1966;葛庭燧,1966)。

20世纪60年代,张进修等在固体中动态黏弹性内耗及其机理的研究中,观测到一种在加场停止即消失的特征内耗。该内耗随加场速率的增大及测量频率的降低而非线性地增大,并与测量振幅无关。作为一种普遍现象,它存在于金属与合金的范性形变过程,合金和陶瓷的变温相变过程,形状记忆合金的应力诱导相变过程,软磁材料金属玻璃乃至高温超导体的磁化过程,铁电体的极化过程以及金属玻璃的晶化过程。同上述过程中可动缺陷(位错、晶界、畴界、量子磁通等)在外场交互作用下的运动方程及其分析解,统一地解释这种黏弹性内耗的普遍规律。在一级相变中的界面动力学和耗散函数的研究方面,张进修等从一级固态相变涉及点阵重组和相界运动需消耗能量出发,通过内耗数据计算出相界面的动力学及能量耗散表达式。

1970—1978年,刘显芬等对各种球墨铸铁热处理后的组织和性能进行了广泛的研究,李楚均、林光明等在国内首次测定了各类稀土球墨铸铁的断裂韧性值,研究了石墨的形状和分布、裂纹锐度等对断裂的影响。同时期,在省科委支持下,刘宝榆等研制成AgO-AgCl皮肤电极,成功地用于心脏反搏器和心脏功能的监测;朱志沂、潘幸等研究了镍锌铁氧体感温材料并广泛用于电饭煲等产品;王运新研究了在外加磁场和应力场作用下AlNiCo₈永磁合金中的调幅分解。

1979—1983年,张进修与国内外同行合作,研究钽、铌难熔金属中氧、氮原子的扩散行为及其与位错的交互作用,对寇斯特内耗峰的机制进行了深入研究,连同他和葛庭燧等于20世纪60年代合作的反常位错内耗工作等,以《反常位错内耗和范性形变机理的研究》系列论文,获1983年国家自然科学三等奖(增强出版:附图5)。

1982—1985年,郑裕芳(1983)和余正方等(1987)采用

精细的穆斯堡尔谱学技术,研究了在居里温度T_c附近铁的同质异能移,证实铁由铁磁态转变为顺磁态时不存在同质异能移的跃变。

1986—1987年,林德明、郑裕芳等进行非晶合金中的结构弛豫,玻璃化转变以及穆斯堡尔谱学的研究,受到国外同行的广泛注意。1987年,林光明、张进修、黄元士等突破了应力只能诱导产生热弹性马氏体相变的传统观念,提出应力既可诱导又可制约热弹性马氏体相变的新观点,首次获得了比普通形状记忆相变速度要高约1000倍的速动形状记忆相变,提高了比热推力和控温动作温度精度(林光明等,1993)。

2.3.2 半导体物理、半导体器件物理、表面界面物理 1958年,中山大学开始进行半导体材料锗、硅的制备和锗二极管、三极管及光敏电阻的试制工作,并开展半导体材料物理和器件物理的研究。1961年开始,彭少麒等(1964,1965)、彭少麒(1979)研究了杂质砷的表面浓度和锗晶体掺铜本底浓度对砷扩散系数的影响;黄炳忠等研究了P-N结的击穿机理;刘惠周等(1989)研究测定半导体扩散层表面浓度、P-N结深度及扩散系数的霍尔效应方法,理论曲线与实验结果相符合。

从1978年起,物理学系开展利用椭圆偏振光谱方法研究固体(包括半导体)的表面、界面、薄层和薄膜。1980年,黄炳忠、余玉贞利用椭圆偏振光反射原理求得Si-SiO₂过渡层的折射率和厚度以及氧化后硅衬底复数折射率的变化;莫党、陈树光等用椭圆偏振光谱研究Si-SiO₂膜和硅的色散;莫党等首次提出和实现用椭圆偏振光谱方法研究离子注入半导体引起的损伤和注入后样品退火效应。1985—1987年,莫党、何星飞等进一步发展了椭圆偏振光谱无损地测定离子注入引起半导体中缺陷的空间分布的方法,首创性地把分数次微积分引入到固体带间光谱的分析中;黄炳忠、余玉贞用椭圆偏振光谱方法,实现了对复数折射率薄膜的研究和对Si-SiO₂界面粗糙度的研究。

1979年,彭少麒等研究了射频溅射法和辉光放电法生长的非晶硅(a-Si)的光学性质、氢化对a-Si膜的光电和光学性质的影响。1983年,章佩娴、朱琼瑞、彭少麒等发现a-Si薄膜中的一种光诱导效应,这一新发现引起国际同行重视。1985年以后,姚杰、章佩娴在低压化学气相沉积(LPCVD)制取a-Si薄膜研究方面发表了多篇论文。1985—1987年,苏子敏、彭少麒等发展了一种用内光发射研究非晶硅隙态特性的新方法。1986年以后,陈树光、林树汉等对非晶半导体光学性质及有效介质理论进行了研究,并对类金刚石碳膜的制备和光学性质进行了研究。1987年开始,彭少麒、苏子敏、刘景希等观察到a-Si薄膜的横向光生伏特效应的特性进行了分析。在此基础上发明了非晶硅光位置敏感器件(彭少麒,1979;彭少麒等,1981)。

1982—1983年,刘惠周研究了Si(111)2×1解理表面的结构,得到一套可靠的低能电子衍射I-V曲线,支持了π键链理论模型。1985年以后,刘惠周等(1989)在中型计算机中建立起半经验的紧束缚法能带计算的整套程序,用表面结构能量极小方法研究表面结构,首先提出考虑表面各结构件的相互作用的表面结构能理论计算方法,实现了对具有巨大表面

元胞的 Si(111)7×7 结构的再构机理分析(此项研究于 1989 年完成)。

1982—1985 年,徐耕等应用低能电子衍射的实验研究和动力学理论分析,确定了 GaAs(111)和 GaP(111)的 2×2 表面原子排列结构,提出表面 Ga 空位稳化的结构模型,指出这个晶面与 GaAs(110)1×1 表面有相同的再构造机理。此结果得到国际同行的公认。同时期,莫党等(1983)研究砷化镓上贵金属膜的光电子能谱和金属-半导体接触的肖特基势垒,对流行的统一缺陷模型提出了修正。

1985 年,姚杰等(1981)发现了红宝石激光脉冲辐照能使 P 型硅表面一薄层转变成 N 型,并对这一效应的原因、条件、规律性作了研究,为制造特殊需要的浅 P-N 结提出了一种新的可能方法。

1987 年,莫党(1989)、莫党等(1990a, 1990b)发展了一种新的穆斯堡尔谱-间相关穆斯堡尔谱,为半导体的离子注入的研究提供一种新的研究手段。

2.3.3 电介质物理 1978 年,李景德倡议组织全国力量编著了中国第一本较全面的《电介质物理学》专著。1978—1981 年,史隆培(1978)研究了 KDP 型晶体的铁电相变,预言在远红外存在很强的非线性光学效应。

1981 年,许煜寰和山东大学陈焕矗在美国进修期间合作研制成功填满型青铜结构铁电单晶 KNSBN,并对其优异的光折变性能进行了研究(陈焕矗等,1981,1982,1982b, 1982c;许煜寰等,1983,1985)。该项研究获 1986 年国家教委科技进步奖二等奖。

1982 年,李景德、沈文彬和雷德铭制成新型热释电材料,用于温度微小变化量的测量,可精确到±0.001 °C,是国内外最精确的接触式温度计之一(李景德等,1984)。

1983—1987 年,李景德和雷德铭等设计了大量的实验,广泛证明了唯象理论的预言。为研究电介质和铁电体的边界效应,李景德等还成功地解决了从 0 维到 1、2 和 3 维有限晶格动力学的数学方法,得到了例如边界耦合软模等一些新的数值计算结果(李景德,1984,1986;李景德等,1985a, 1985b, 1986;黄学雄等,1986a, 1986b, 1987;朱梓英等,1987)。

2.3.4 超导研究 1987 年,许煜寰、李仲荣和杜仲廉等制出转变温度大于 100 K 的高温超导材料。同年,许煜寰、李仲荣等研究铝-锂掺杂对钇系超导体性能的影响;张进修、林光明等研究工艺和成分对钇系超导体性能的影响,银包复超导线的特性,氧缺位及其组态的有序-无序转变对高温超导体性能的影响(香港大学冯戩云和香港城市理工学院萧季驹参加了部分工作),杜仲廉等研究高温超导体的电声效应,林光明、黄清珠等研究了钇系超导体中正交-四方转变的 X 射线衍射特征和超导体性能关系由林光明、许煜寰、张进修等进行的上述研究获得了 1988 年广东省自然科学二等奖(林光明等,1988, 1991;杜仲廉等,1987;曾文光等,1990;周义昌等,1983;刘金明等,1984;许煜寰等,1987;中山大学,1987;曾文光等,1990)。

在过去近 40 年的时间里,研究人员在铜氧化物超导体体系开展了大量研究工作,发现了一些可能的规律。中山大学物理学系研究人员早期在铜氧化物高温超导体性研究中取

得了一系列有影响力的研究成果。然而铜氧化物超导体是唯一在液氮温区超导的材料体系,高温超导机理至今仍是重要的科学问题之一。铜氧化物中铜离子为正 2 价,与正 1 价的镍离子具有相同的电子排布,此前研究人员一直在正 1 价镍氧化物材料体系中探索超导体性。

王猛教授团队另辟蹊径,利用物理学院公共科研平台设备成功生长了 La₃Ni₂O₇ 单晶样品,随后在自主搭建的高压实验研究平台上测量发现 La₃Ni₂O₇ 单晶样品在 14 GPa 压力下出现高达 80 K 的超导体性,是一类新的高温超导体体系!这是继铜氧化物高温超导体后,第二类转变温度高于液氮沸点的高温超导体。而本次发现高温超导的镍氧化物 La₃Ni₂O₇ 中 Ni 的价态为正 2.5 价,远离人们此前认为可能出现超导体性的正 1 价。通过对其物理性质的分析,发现层间耦合对高温超导起到了重要作用。相关研究成果以“Signatures of superconductivity near 80 K in a nickelate under high pressure”为题于 2023 年 7 月 12 日在 *Nature* 杂志在线发表(Sun et al., 2023),*Nature* 杂志还专门发表了题为“Elite superconductor club has a new member”的评论文章(Hepting, 2023)。压力下镍氧化物高温超导体的发现迅速引起了研究人员和媒体的关注,获人民日报、新华社、央视新闻、中国科学报、南方日报、羊城晚报、国家自然科学基金委网站等广泛报道,也被中央电视台中国新闻栏目、广东省新闻联播等报道。在该工作基础上,物理学院姚道新教授还与王猛教授合作建立了双层镍氧化物的多轨道模型,成为分析镍氧化物电子能带结构和超导体性的重要基础性理论工作(Luo et al., 2023)。

La₃Ni₂O₇ 单晶样品中发现超过液氮温度的高温超导体性超出此前理论预期。通过镍氧化物与铜氧化物、铁基超导体对比研究,可能确定决定高温超导的关键因素,推动解决高温超导机理,指导研究人员设计、合成更多具有更高超导转变温度的材料。镍氧化物高温超导的研究很快成为国际超导研究热点。液氮温区镍氧化物超导体的发现入选“两院院士评选 2023 年中国十大科技进展新闻”和“2023 年中国重大科学、技术和工程进展”。

2.3.5 凝聚态物理国家重点学科建设(1996—2001) 凝聚态物理重点学科建设措施是引进杰出人才、发展新方向。在 2001 年国家重点学科评审中,中山大学凝聚态物理入选国家重点学科(2002 年 2 月公布)。

场致电子发射研究(许宁生院士团队)。场致电子发射及其应用研究方向及其团队(以下简称场发射研究团队)由许宁生院士于 1996 年创建,是光电材料与技术国家重点实验室核心团队。团队获国家基金委创新研究科学基金资助,荣获 2 项国家自然科学基金二等奖(增强出版:附图 13),培养了包括 1 名中科院院士、2 名国家自然科学基金杰出青年基金获得者、1 名国家中青年科技创新领军人才、1 名教育部青年国家级高层次人才等一批杰出和优秀人才,承担国家 973 计划和 863 计划、国家重大科学研究计划、国家重点研发计划等重大重点项目,培养毕业的研究生中 3 人获得全国百篇优秀博士论文奖,2 人获得全国百篇优秀博士论文提名奖。

2000 年,许宁生教授主持的“金刚石及其相关薄膜的场

致电子发射特征和机制”项目获广东省科学技术奖一等奖,该项目2001年获国家自然科学基金二等奖。同年,许宁生教授团队获国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助,是全国第一批获资助的创新群体,也是中山大学第一个国家级创新群体。

2001年11月,许宁生教授创建光电材料与技术国家重点实验室。该实验室由原超快速激光光谱学国家重点实验室和广东省显示材料与技术重点实验室合并组建,整合了物理、化学、材料、电子、光学工程等相关学科优势力量,重点在发光和显示材料与技术、光电能量转换材料与技术、光电子集成器件与技术、超快光谱及激光与物质相互作用与过程、材料合成与制备、光电材料物理理论等方向上开展研究。光电材料与技术国家重点实验室挂牌仪式在广州校区南校园激光楼举行。

2002年,许宁生教授率领的场致发射与平板显示研究中心团队被广东省教育厅评为2002年广东省高等学校第一期“千百十人才工程”先进团队。

2003年,许宁生教授团队承担的国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目通过考核,被批准获延续资助。同年,许宁生教授作为首席科学家获批承担国家重点基础研究发展计划(简称973计划)项目,题目为“新型场发射平板显示和微显示的基础研究”。该项目由中山大学牵头,联合中科院长春光机与物理研究所、中科院微电子研究所、中科院长春应化所、东南大学、吉林大学、北方交通大学等7家单位开展科技攻关,彰显了团队在面向国家战略需求,开展有组织科研的能力和担当。

2006年,许宁生教授主持的“米冷阴极及其器件研制”获广东省科学技术奖一等奖,2007年获国家自然科学基金二等奖,主要完成人为许宁生、陈军、邓少芝、李志兵、余峻聪。

场发射研究团队积极融入地方经济建设和产业发展。2008年10月,中山大学获广东省发展平板显示产业财政扶持项目计划立项,获得5000万专款扶持资金,该项目旨在大力发展广东平板显示产业,树立广东平板显示产业在全国以至亚洲的领先地位。

2009年9月,许宁生教授再次担任973计划项目首席科学家,负责“新型微显示和场发射平板显示高品质化及应用的基础研究”(信息领域)的研究工作。

2010年11月,场发射研究团队因在真空微纳电子学、新型光电材料与器件技术、新型平板显示技术等研究方面取得突出成绩,获中山大学“芙兰奖”团队奖。

纳米材料研究(杨国伟教授团队)。杨国伟教授带领团队主要从事亚稳纳米材料基础研究,发展了若干亚稳纳米材料制备新方法并制备出系列具有新奇物性及潜在应用的新型亚稳纳米材料,揭示了纳米尺度下材料生长、结构和相变的新规律,发展了普适性的纳米尺度下材料生长与相变及表界面能的热力学理论,预言了系列由表界面能诱导的奇异纳米尺度效应,为材料学家探索新纳米材料提供了理论工具。这些原创性成果,在国际纳米材料科学领域产生了重要影响并在若干研究方向上处于领先地位,有力地推动了纳米

材料学科的发展,为中国纳米材料研究在国际上占有一席之地做出了重要贡献。

2009年8月,杨国伟教授主持的“亚稳纳米材料生长与设计的物理基础”,荣获2008年广东省科学技术奖一等奖。杨国伟教授带领王成新、欧阳钢、杨玉华、王冰等团队成员坚持10余年的研究,在亚稳纳米材料生长的基础研究方面做出了开创性的工作。2011年,杨国伟教授主持的“亚稳纳米材料生长与设计的物理基础”获国家自然科学基金二等奖。2013年,国家重大科学研究计划项目《液相激光熔蚀及在若干光电纳米材料制备中的关键科学问题研究》获批,杨国伟任首席科学家。2015年,杨国伟教授主持的“功能纳米材料与低维物理的应用基础研究”获广东省科学技术奖一等奖(主要完成人)(增强出版:附图14)。

物理力学与光电功能材料研究(王彪教授团队)。王彪教授带领团队一直在微纳米材料物理与力学,材料强度和变形预报的热力学理论,核仿真和核安全关键科学与技术研究,特种激光晶体材料和激光器制备等领域开展研究工作。研究成果不仅理论上具有原创性,而且在应用中也展现了显著的实用价值,为物理学、固体力学、材料科学以及核能等领域的发展做出了重要贡献。

针对力-电-磁耦合的微纳复合结构,系统研究了含界面位错的功能材料动力学行为及基于缺陷、应变和相变的功能材料物理性质调控方法,建立了含界面与缺陷的Landau-Devonshire自由能泛函模型,提出了基于相变临界状态的材料性能调控方法,为准确预报位错等缺陷诱导的局域应力场,并有效调控铁电物理性能奠定了理论基础。此外,针对量子材料的新奇压电属性,构建了普适的微观解析模型和机器学习模型,并提出自旋轨道耦合导致自旋/谷劈裂而引发的谷压电效应,确定了类反常霍尔效应导致非常规方向上的压电响应规律,为量子压电材料的设计和器件构建提供了重要的理论指导。

基于热力学基本原理,建立了一种普适的失效强度预报理论体系。这一理论突破了传统连续介质力学预报方法的局限性,不依赖于经验本构关系和强度准则,而是通过非平衡热力学框架建立材料结构的热力学演化方程,并分析其稳态解的稳定性来建立失效准则,实现对材料结构破坏强度和变形的准确预报。

在核能领域,发展和运用细观力学方法对反应堆安全壳中的钢筋混凝土材料、包含氢化物夹杂的锆合金包壳材料以及包含微孔洞的核燃料材料的力学行为进行了定量的预报。其中钢筋混凝土模型在2012年应用于CPR1000安全壳的强度评估,作为项目《百万千瓦级压水堆核电站严重事故应对若干关键技术研究与应用》的组成部分获2014年度广东省科学技术奖二等奖。

王彪教授研究团队开展了激光单晶制造设备和单晶材料的研发工作,成功研制了具备节能和全自动化特性的激光晶体、闪烁晶体生长装置,开发了全自动晶体生长调控系统,制备出一系列稀土掺杂的YAG、LuAG、YVO晶体,光学级铌酸锂、钽酸锂晶体、磷锆锌等晶体。其中极具工业应用价值的

大尺寸 $\Phi 80$ Nd:YAG、 $\Phi 80$ 铌酸锂晶体已在合作企业实现规模生产。

2004年,王彪教授主持的“含夹杂压电材料的机电耦合场理论”项目,获教育部科学技术成果一等奖。2007年,王彪教授主持的“压电电材料耦合场理论”项目,获广东省科学技术奖一等奖(增强出版:附图15)。2010年,王彪教授获广东省丁颖科技奖。2019年,王彪教授入选“广东省特支计划”杰出人才—南粤百杰。2023年,王彪教授主持的“压电复合材料细观力学”项目,获第九届中国力学学会自然科学一等奖。

环境材料研究(孟跃中教授团队)。孟跃中教授专注于二氧化碳合成生物可降解高分子材料、氢燃料电池和锂离子电池等新材料和新能源方面的研究应用,取得了一系列高水平的研究成果。特别是在二氧化碳化学利用领域专心致志不懈深耕,在二氧化碳合成全生物降解塑料的科学机理研究及生产应用方面取得了具有世界先进水平的系列原创性成果。

“二氧化碳全降解塑料的催化合成、应用开发及产业化研究”项目,2007年获得高等学校科学技术奖自然科学二等奖;广东省环保局、环境保护科学技术奖一等奖;国家环保局、国家环境保护科学技术奖三等奖。

2008年,孟跃中教授获中国发明协会第四届“发明创业奖”特等奖,及“当代发明家”荣誉称号(增强出版:附图16)。2009年12月,孟跃中教授负责承担的广州市纳米技术领域重大专项“广州市纳米环境与能源材料工程研究中心”建设项目通过验收。2010年,广东省科技厅批准成立“广东省低碳化学与过程节能重点实验室”,孟跃中教授为该重点实验室创建人,并连续担任两届实验室主任。

在国家发改委、广东省和河南省的大力资助下,2012年在河南天冠集团建成了全球最大的二氧化碳全降解塑料的生产线。其后又经历了10余年不断探索发展和完善,开发了材料性能更优、生产技术更先进的新一代二氧化碳全降解聚合物(PPC-P)的产业化技术。

2013年11月7日,由广东省科技厅组织的“广东省低碳化学与过程节能重点实验室”建设项目验收会在学院举行。2013年12月,广东省生物分解材料工程技术研究中心获广东省科技厅立项成立。

孟跃中教授在探索基于二氧化碳合成的高分子材料在新型能源和绿色电池中科学研究及应用方面也进行了系统深入的研究,并在新型燃料电池、新型固体锂离子电池、二氧化碳电池、钠电池等方面取得了显著的进展和高水平的成果。相关研究成果已发表了460篇SCI收录论文,其中影响因子大于10的有100篇,另有160多件国家发明专利和6项美国发明专利。曾连续多年入选中国高被引学者。

能源材料研究(沈辉教授团队)。沈辉教授主要从事太阳能材料、太阳电池与光伏理论、太阳能技术和纳米功能材料等研究。

2003年,成立中山大学电力电子及控制技术研究所,主要科研方向包括太阳能发电理论和技术;车船电力传动系统及控制策略;可再生能源系统中的电力电子技术和特种电源技术等。“光伏水泵系统”是研究所的特色研究成果。

2004年,创建中山大学太阳能系统研究所。2006年,获广东省教育厅重点实验室建设项目资助,承担中山大学二期985工程项目“太阳能系统科技创新平台”建设。

2010年,沈辉教授的“采用PVB封装的新型光伏建筑一体化组件及系统的研制、产业化与应用”项目获广东省科学技术奖二等奖。自2011年起,太阳能系统研究所连续举办4届光伏年会(增强出版:附图17)。2014年,沈辉、梁宗存等的“高性价比晶体硅太阳能电池关键技术研究”,获广东省科学技术奖三等奖。2016年,付青的“光伏发电系统集成及逆变电源研发成果产业化”获广东省科学技术奖二等奖。2021年,沈辉、梁宗存的“管式等离子体增强化学气相沉积系列设备关键技术创新及产业化”,获广东省科技进步奖二等奖(增强出版:附图18)。此外,团队还获得省部级及各类行业奖项数十项。

能源材料研究(沈培康教授团队)。沈培康教授主要研究方向为:材料物理与化学,包括电化学基础和技术、微观电化学;新型能源技术,包括燃料电池、超级电容器、锂离子电池在内的能源材料和装置等高能电源技术;纳米材料和应用技术,包括纳米功能材料和器件、传感器、石墨烯商业化等。

在产学研方面,沈培康教授一直开展新型化学电源及关键材料的研究,掌握了具有自主知识产权的液体直接氧化燃料电池技术和高效催化剂生产技术,获得多项专利成果;在此基础上课题组非常注重与国内外企业展开紧密的合作。与国内江门大长江集团有限公司、浙江高成绿能科技有限公司等多家企业展开合作进行便携式燃料电池批量生产。

沈培康教授常年致力于新型清洁能源材料的研究,研究方向包括燃料电池、锂离子电池、超级电容器和储氢等能源领域的关键材料。在燃料电池方面,国际首创了具有自主知识产权的交替微波加热法,建立了批量制备纳米材料的通用方法。开创了以离子交换树脂为基础材料定域可控制备纳米材料的方法。是国际上在电催化材料领域研究得最深入、取得成果最多的团队之一,且得到国际同行的认可和高度评价。在世界范围内领先且系统地研究了碳化物基、氧化物基和钨基系列催化剂。

2011年,沈培康教授团队的“纳米电催化材料的功能定向生长和催化机理研究”项目获广东省科学技术奖一等奖,2013年,“纳米电催化材料的功能定向生长和催化机理研究”项目获国家自然科学基金二等奖(增强出版:附图19)。

2.3.6 建设高能直接几何非弹性中子散射谱仪 中国首座散裂中子源(CSNS)项目于2011年在广东省东莞市开工建设。中山大学毗邻散裂中子源,在CSNS建设之初即提出与源合作建设中子散射谱仪的宏大愿景。

2013年10月,中山大学作为执行主席单位参与组织第469次香山科学会议,会议主题为“中子科学平台及其在先进材料研究中的科学前沿和重大需求”,汇聚了众多科学界的翘楚,时任校长许宁生院士作为共同召集人参加会议(增强出版:附图20)。

2017年,中国散裂中子源和首批三台中子散射谱仪建设完成。时任物理学院院长郑跃教授前瞻性地提出发展中子学科,推进与中国科学院高能物理研究所合作,联合建设中

子散射谱仪。同时积极引进中子散射相关人才。王猛教授作为学术骨干加入中子散射谱仪建设项目,为中子散射谱仪建设注入了新的活力,为项目推进提供了宝贵的建议和支持。

2017年12月13日,时任校长罗俊院士与中国科学院高能物理研究所所长王贻芳院士签署合作协议:确定双方在中国散裂中子源合作建设高能直接几何非弹性中子散射谱仪(图7)(增强出版:附图21~22)。



图7 中山大学与中国科学院高能物理研究所签署合作协议
(2017年12月13日)

2018—2019年,物理学院在学校指导下开展了多轮中子散射谱仪物理设计论证会,谱仪的各项指标参数逐步明确。其中2018年7月举行了国际论证会(增强出版:附图23),多位来自美国、英国、日本、法国等非弹性谱仪建设专家与会,他们的参与提供了宝贵的国际视角,进一步提升了中子散射谱仪设计的科学性和前瞻性。物理学院联合散裂中子源科学中心根据谱仪建设物理参数要求编制了详细的可行性研究报告,2019年9月通过了专家组论证。11月中山大学与散裂中子源中子科学中心签署委托建设协议,标志着中国首台高能非弹性中子散射飞行时间谱仪项目正式开工建设。该谱仪入射中子能量范围10~1 500 meV,适合研究2 meV以上磁散射及晶格散射研究,样品环境包括7 T磁场以及2~600 K可变温度样品环境。在物理设计方面,采用多入射能量及单入射能量可调模式,这一创新设计显著提高了实验效率,拓宽了研究范围;其宽广的入射能量范围,为已知物理现象研究提供了有力工具,更为探索新物理领域提供了可能;样品环境丰富,预留极化中子安装条件,进一步增强了谱仪的科研潜力,提高了应用价值。2020年5月,物理学院成立中子科学与技术中心,负责与散裂中子源科学中心协调推进谱仪建设。2023年1月12日首次成功出束,并开始带束调试,获得与设计相符的中子能谱及单能入射中子,标志着谱仪设备研制与安装初步成功。

2023年11月12日,高能非弹性中子散射谱仪正式揭牌。中山大学党委书记陈春声,中国科学院院士、中山大学校长高松和中国科学院院士、中国科学院高能物理研究所所长王

贻芳院士等领导参加了揭牌仪式(图8)。



图8 2023年11月12日,高能非弹性中子散射谱仪揭牌

中山大学物理学院与散裂中子源中子科学中心联合建设的这台中子谱仪(图9),填补了中国在高性能非弹性中子散射飞行时间谱仪领域的空白。它的建成,为声子谱和中高能磁激发谱等物质动力学研究提供了世界一流的研究平台,并将极大地提升物理学院服务国家战略需求和开展国际科技前沿研究的能力,进一步巩固和增强物理学科的国际影响力。

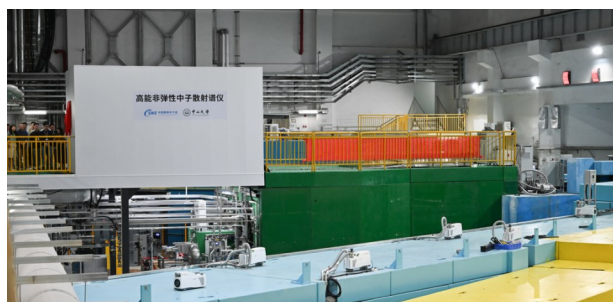


图9 高能非弹性中子散射谱仪(2023年11月12日)

2.4 粒子物理与原子核物理

1942年4月,卢鹤绂教授撰写了论文《重原子核内之潜能及其利用》,首次向国人介绍发现重核裂变概况及其展望。卢鹤绂因此被国外称为“世上第一位公开揭露原子弹秘密的人”和“中国核能之父”。但该论文迟至1944年2月才发表在《科学》杂志27卷2期(增强出版:附图24)。

2.4.1 原子核性质和核反应研究 1965—1967年,张纯祥在丹麦哥本哈根大学玻尔研究所与丹麦科学家G.B.Hagemann、日本科学家T.Yamazaki合作,开展原子核同质异能态研究,取得了良好的结果(Chang et al., 1969)。同时,他与丹麦科学家B.S.Madsen合作进行同位旋相似态的核反应研究。

20世纪70年代末,张卓良和李向程开始电子共振核反应和中子共振参数编译和分析工作;何锦昌、李冕丰研究中子共振截面的多普勒展宽,分析、评价和推荐了30多个核素的中子共振参数、截面及不可分辨共振区的统计参数,用蒙特卡罗方法计算中子在不同厚度材料中多次散射的修正,将其用于多种实验截面中子共振参数的相关分析中(何锦昌等,1981)。

核分析方法。1980年,郑裕芳和余正方等建立起穆斯

堡尔谱仪,研究固体中的超精细作用,磁相变现象,磁性、铁电和非晶合金等材料的性能、结构和弛豫等(郑裕芳,1983a,1983b;郑裕芳等,1983)。1984年,朱梓英用正电子湮灭谱仪研究铁电材料和电介质的性质(林光明等,1995)。

环境放射性监测方法。1975—1983年,张纯祥、关祖杰等系统地研究大气中氡钍及其子体浓度的各种测量方法。1981—1984年,罗达玲、张纯祥研究野外 γ 能谱法,建立了现场和室内 γ 能谱系统,进行核素含量分析及环境 γ 辐射空气吸收剂量率确定,上述方法均被用于广东阳江地区高本底辐射研究。1983—1987年,张纯祥和罗达玲研究了氡钍浓度与肺癌危险度的关系(张纯祥,1974;张纯祥等,1979,1982a,1982b,1984;罗达玲等,1985)。

辐射探测器研制及特性研究。1963年开始,张纯祥、朱永亮等研制CDS单晶(张纯祥,1974);1970年,张纯祥、赵资智用以试制用等大剂量测量的 γ 辐射仪,研究其灵敏度、响应特性;1972年,赖锡安、何锦昌等在辐射仪上加通讯功能,用于核爆现场(赖锡安等,1984)。1985年,李向程等研制G-M计数管;罗达玲、李冕丰等研究DDA/CBR4无氰剂量片的辐射剂量响应,又建立起丙氨酸-电子自旋共振剂量测量系统,并研究其特性,用于剂量传递及二级剂量标准(罗达玲等,1988)。

计算机在核物理中的应用。1980年,何锦昌、李冕丰编制和移植了从反应截面提取单能级共振参数的形状拟合程序和面积分析程序,中子共振参数的联合分析程序,还编制了中子共振参数之间的转换程序。1981年,关祖杰、赖锡安等研制出多道脉冲幅度分析器和微型计算机接口,并编制一系列解析 γ 能谱的计算机程序。1985年,张纯祥、赖锡安等试制出氡钍子体自动测量系统及编制了相应的计算机程序。1986年,关祖杰、罗达玲等建立FJ377热释光读出装置Apple II联机系统,编制出相应的计算机程序(张纯祥等,1979,1982a,1984;赖锡安等,1984)。

粒子径迹结构理论研究。1983—1984年,张纯祥与粒子径迹结构理论的创始人R.Katz合作,研究重离子径迹周围能量沉积分布,改进径向剂量分布的计算公式,提高了对高能粒子束与物质相互作用截面的计算准确度。1985年,张纯祥、罗达玲开始用物理、化学和生物探测器实验数据进一步验证和改进粒子径迹结构理论模型(张纯祥等,1979,1994,1996)。

电离辐射对物质损伤机制研究。1986年开始,张纯祥、李冕丰等与昆虫研究所合作,以斜纹夜蛾多角体病毒为靶材料,研究电离辐射与生物体相互作用过程中辐射能量沉积的微观机制,中间产物自由基、DNA断裂及生物学宏观效应,寻找各阶段间的相互联系及定量关系,获得自由基浓度与电离辐射吸收剂量互成正比关系,昆虫病存活率与自由基浓度呈线性平方关系。

电子束与物质相互作用。20世纪70年代,物理学系建立2 MeV电子静电加速器,80年代,朱永亮、赵资智和温平等研究电子与物质相互作用产生的效应,并用于对天然乳胶辐射硫化、制备阳离子交换纤维功能材料、辐射保鲜及辐射诱发花卉畸变等。

辐射探测研究。1964年,物理学系开始研制硫化镉单晶辐射探测器。在研制过程中,解决了单晶烧结、电极处理等技术问题,并对剂量响应、反应时间等进行了研究,于1974年完成研制工作。该探测器尺度为厘米级,属国内首创。同年成功地在中国核试验现场作剂量测量。相关研究论文,分别发表在《原子能科学技术》(1966年第5期)和《中山大学学报(自然科学版)》(1974年第1期)(张纯祥,1974)。

1978年,张纯祥等采用 α 粒子能量甄别方法,测定空气中的钍及氡子体浓度,较好地克服了氦和氢的相互干扰问题,明显提高了测量精度。1979年,张纯祥在日本召开的第六次世界辐射大会上宣读了反映该成果的论文《 α 粒子甄别方法测量钍和氡子体浓度》。1984年,又利用这项技术,研制成微型计算机控制和进行数据处理的“氡、钍子体浓度测量系统”,用于矿山和环境氡、钍浓度监测,但该成果未转化成产品推广使用。

穆斯堡尔谱和 γ 能谱分析。从1980年起,物理学系用穆斯堡尔谱仪研究固体超精细相互作用、多种磁性材料、非晶合金和特殊陶瓷材料的微观机制及古陶器的烧制技术等,在《科学通报》等刊物发表Sr(Fe_{1-x}Ti_x)O_y系列材料的穆斯堡尔谱学研究等论文40篇。

1983年,物理学系研制成功“多道-微型计算机核能谱系统”装置,是国内最早用微机配接国产多道的系统之一,用该系统制成“野外 γ 谱系统”在1983年完成阳江高本底地区及恩平、台山对照地区的野外 γ 谱测量工作,获得较准确的高本底地区辐射数据。

辐射本底及公众受照水平调查。1961—1962年,由中国军事医学科学院主持,中山大学、中山医学院等单位参加,监测美国在太平洋进行核武器试验对广州、湛江、汕头地区的环境影响,建立了放射性活度测量方法,观察到大气沉降物中总 α 总 β 活度的异常改变。1972年,张纯祥、余正方、关祖杰等参与了由卫生部主持“广东阳江天然放射性高本底地区调查研究”中有关“氡、钍射气及其子体的浓度测定和剂量估算”项目,“高本底地区居民健康状况的调查(1975—1976)”项目获得1978年“全国科学大会奖”。至1986年,系统地研究了高本底辐射成因及辐射水平,在《中华放射医学与防护杂志》(1982年第2卷第2期)、*Science*(1980年第209卷)(增强出版:附图25)等刊物上发表论文36篇,该项研究属国内首次,研究地区已成为国内唯一可进行辐射对人体健康影响群体研究的现场。“广东阳江天然高本底辐射地区居民健康状况调查”项目1985年被中华人民共和国卫生部授予甲级科学技术成果荣誉证书。

1979年,中山大学参与了对深圳大亚湾及其周围地区的天然放射性本底进行测量调查,调查资料在大亚湾核电站预选厂址比较评估中被应用。该研究是核电站运行后潜在的放射性污染评价的重要基础。

放射损伤及微剂量学。20世纪80年代中期,张纯祥等在低剂量 α 粒子照射的肺癌危险度研究中,应用微剂量学,建立辐射对细胞作用模型,提出辐射使细胞死亡与诱发癌变是一个相竞争的过程,吸入氦和氢的子体引起肺癌发病率与

剂量呈二次方关系,氡致肺癌危险度的上限为 10^{-4} 工作水平月。1986年在美国 *Health Phys.* 发表论文《低剂量 α 粒子致肺癌危险度》,这是中国发表在该刊的少数几篇论文之一。

2.4.2 发光剂量学材料、测量方法和机制研究 1989年,罗达玲、张纯祥、黄乃明、刘辉等开始进行热释光剂量响应研究。1992年,罗达玲、黄乃明、张纯祥等在《核技术》1992年第15卷第1期发表论文《LiF热释光剂量响应的研究》,该文于1995年被评选为“王淦昌优秀核科学和核技术论文奖”(1992—1993年度)(罗达玲等,1992)。该文同时获得1992—1993年度广东省优秀学术论文二等奖。

罗达玲和张纯祥1995年发表的论文“Nonlinearity of dose responses in thermoluminescence dosimetry”作为《中国核科学报告》在国际原子能机构发行(罗达玲等,1995)。

1994—2000年,张纯祥、罗达玲、唐强、邓邹平、陈立新、李国桢、徐则达、陈晶亮等开展了热释光发光特性与模型研究和“热释光材料的剂量特性与缺陷研究”。此外,他们还研究了多种磷光体的热释光特性和剂量学特性。

1998—2000年,张纯祥和唐强研制了集成二维、三维光谱的测量的热释光测量控制系统,并制成了一台热释光-光释光三维光谱仪。1998年,邓邹平、罗达玲、朱梓英、张纯祥、李景德等完成的《热释光材料LiF:Mg, Ti, LiF:Mg, Cu, P和MgSO₄的正电子湮没特性》,发表在《核技术》1998年第2期。张纯祥、唐强、罗达玲、李国桢等完成的《掺稀土元素Dy和Mn, P, Cu的MgSO₄的热释光发光光谱》,发表在《物理学报》2000年第10期。罗达玲、唐强、张纯祥、李国桢等完成的《MgSO₄:Dy, P和MgSO₄:Dy, P, Cu的热释光剂量学特性》,发表在《核技术》2001年第12期。2001年12月,罗达玲、张纯祥、邓邹平、李国桢等撰写的论文《热释光新材料硫酸镁的研究》,荣获第九届广东省自然科学优秀学术论文二等奖。熊正焯、唐强、张纯祥的论文《掺Cu, Ag, Mg的Li₂B₄O₇磷光体的热释光研究》,发表在《中国科学(G辑)》2007年第37卷第2期。

2.4.3 核技术在医学中的应用 1995年,核物理教研室开始进行核技术在医学中应用的研究。刘小伟、张纯祥等与广州医科大学附属第二医院合作,完成了伽马刀剂量分布的Monte Carlo计算,并开展了伽马刀治疗计划设计研究。相关的结果发表在《核技术》(1996年19卷第2期)、*Phys. Med. Biol.* (1999年44卷)等杂志。在核医学方面,与中山大学肿瘤医院樊卫教授合作开展了内照射吸收剂量计算系统的研制工作,建立了核素治疗三维剂量计算系统(Zhang, 1995)。

2005年后,刘小伟教授研究组研究内容主要为医学物理和技术,针对放射治疗中的物理和技术问题开展研究。刘小伟教授从2002年开始研究内容包括放射治疗中的剂量计算和测量、治疗计划的验证及质量控制、深度学习在放射治疗方面的应用等。相关的研究结果发表在*Phys. Med. Biol.*、*Med. Phys.*、*Radiat. Oncol.*等杂志上(刘小伟等,1996;Chen et al., 2006, 2009; Han et al., 2020; He et al., 2023; Jin et al., 2013)。

2.4.4 粒子物理与原子核物理新发展 2010年,依托中山大学理工学院师资队伍,中山大学成立了中法核工程与技术学院(简称中法核学院或IFCEN),粒子物理与原子核物理学

科在应用研究方面得到了进一步的拓展,有了一支核物理与核技术应用方面的师资队伍,并开始了学科建设。经过10余年发展,截至2024年,中法核学院在核物理与核技术应用领域已经具有了相当的规模,在国内外多个核物理的大型装置和核物理实验上如HIFRL、HIAF和JUNA上都做出了重要的贡献与成绩。

理工学院的理论物理、粒子物理与原子核物理学科联合组织团队成功加入了天体粒子物理实验AMS、粒子物理实验BESIII、大亚湾反应堆中微子实验(简称Daya Bay),和江门中微子实验(简称JUNO)。尤其是在AMS和JUNO实验上,中山大学承担了重要核心子系统任务。AMS02硅微条轨迹探测器热控系统的建造由中山大学团队负责,为硅微条轨迹探测器的精确测量提供稳定的热环境,保证硅微条轨迹探测器的测量精度(增强出版:附图26);在JUNO项目上,中山大学负责多个二级、三级子系统的研发和建造安装工作,包括但不限于JUNO-TAO近点探测器的缪子反符合系统TAO-TVT、PMT的性能评估与质量控制、探测器的灌装系统、有机玻璃胶接技术、含事例显示的多个软件系统等(增强出版:附图27),为实验的成功建设做出了不可或缺贡献。

此外,2014—2015年,粒子物理与原子核物理学科在中国科学院高能物理研究所的帮助下加大了学科建设和人才引进的力度,进一步拓展了在高能物理领域的工作。2015年,中山大学理工学院重组为物理学院,部分粒子物理与原子核物理研究团队成为多个新建学院的种子队伍,包括但不限于物理与天文学院和理学院。同时,中山大学在粒子物理与原子核物理方向进一步增加学科投入、加强学科建设、扩大师资队伍、拓展研究领域,目前在PandaX、ATLAS、CMS、STCF、DUNE等多个重要的实验上都承担重要任务并有出色的科学贡献。近年来,中山大学粒子物理与原子核物理学科在多个国内外一流的高能物理、粒子天体物理实验上发挥了不可或缺的作用,取得了出色的学术成果并培养了一批国际一流的高能物理人才,获得了广泛的国际赞誉。

2.5 引力波探测研究

2.5.1 20世纪中山大学引力波研究 1974年,中山大学成立研究小组着手探测引力波,比世界上最早的引力波实验研究晚十几年。1976年,引力波探测成为国家重点科研项目,物理学系开始设计和建造实验室。陈嘉言、管同仁等先后完成了隔振、定标和Q值测定等研究和小型引力波天线模拟试验。1979年,陈嘉言在第二届格罗斯曼会议上报告的中山大学小型引力波探测试验引起了国际同行的注意(陈嘉言等,1975;中山大学物理学系引力波研究组,1977;中山大学,1979a, 1979b)。

1980年,引力室完成了引力天线的隔振装置。1981年,引力室完成真空系统、天线制作、换能器安装、低噪声前置放大器、相关检测等研究,测定了天线的参数和热噪声曲线,初步建成了中国第一座两吨室温引力波天线系统(增强出版:附图28)。

1982—1984年,胡恩科、管同仁等改进了天线换能器和测量系统,应用计算机采样记录和处理数据,进而研究了天

线的机械背景噪声,使室温天线系统达到国际同类天线的先进水平。1985年,与美国斯坦福大学联合进行东西两半球的引力波符合探测实验,共同发表了符合实验的结果。引力室的室温引力波天线系统,于1987年在广东省高教局主持下通过鉴定,专家们确认其达到国际同类天线的先进水平(该项目1988年获广东省自然科学奖二等奖)(陈嘉言等,1979,1980;郑庆璋等,1980,1982)。

引力实验。1980年,管同仁等完成了精密扭摆的研制,并参加了云南日全食引力异常的观测工作。1982年,管同仁、胡恩科等改进同步装置并继续进行观测,他们在 10^{-8} 精度上没有发现日、月食期间的引力异常现象。管同仁等还对提高扭摆精度作了大量的研究工作和多次进行月食期间引力异常的观测,在实验精度范围内均得到零结果(陈嘉言,1982;陈嘉言等,1982;王国宗等,1983)。

引力波探测理论和引力理论。1979年,卢文等为从理论上探讨引力波辐射的孤波问题,研究了偏微分方程的孤子。1980-1982年,陶福臻等研究“电磁场与引力波相互作用”和“引力波对电磁场的作用与引力波的电磁探测的可能性”(胡恩科等,1983;陶福臻等,1984)。

同时期,郑庆璋和崔世治从理论上研究了一种以扭摆为基础的可调谐天线;同时,还研究了弹性天线的本征频率与温度的关系,得到与实验一致的结果(郑庆璋等,1980)。

从1986年开始,唐孟希和重庆大学李芳昱合作,计算晶体阵列高频振荡加上相位调制后的引力辐射强度和空间角分布(李芳昱等,1987,2000,2001;唐孟希等,1997,2002)。

2.5.2 新世纪中山大学引力波研究——天琴计划 20世纪80年代,华中科技大学开始基础引力实验研究,于2000和2002年开始布局空间引力波探测的两大核心关键技术——空间惯性传感和星间激光干涉测量的研究,并于2006年实现了我国空间簧片加速度计的第一次搭载试验。2006年,簧片加速度计搭载成功。

2007年,在第316次香山科学会议上,罗俊院士建议国家开展空间引力波探测研究。2013年,我国自主研制的静电悬浮加速度计在轨试验成功,为自主开展空间引力波探测任务跨出了关键的一步。2013年,静电悬浮加速度计首次在轨试验成功。2014年3月正式提出天琴计划,并于12月8日召开了第一届天琴空间科学任务研讨会。

2015年,罗俊院士调任中山大学校长,于7月正式启动天琴计划推进工作。天琴计划是空间引力波探测的“中国方案”,预期于2035年前后在约10万km高的地球轨道上,部署3颗全同卫星构成边长约为17万km的等边三角形星座,建成空间引力波天文台,进行基础物理、天体物理及宇宙学的前沿研究。2016年1月,天琴团队在“Classical and Quantum Gravity”发表重要文章“TianQin: A space-borne gravitational wave detector”,阐述了天琴计划的总体思路和目标(Luo et al., 2016)。

2016年3月20日,为保障天琴计划的顺利实施,中山大学召开“天琴计划”基础设施项目奠基仪式,布局“一个中心+三个台站”,“一个中心”即天琴中心,“三个台站”即天琴测距

台站、天琴测地台站、天琴模拟台站(增强出版:附图29)。

2018年9月26~27日,第S45次香山科学会议“天琴计划与国际合作”召开,围绕天琴计划的必要性和紧迫性、天琴计划的技术基础、天琴计划的发展路线及可行性、天琴计划国际合作的组织方式等各方面进行广泛研讨,提出具体建议。

2019年12月31日,天琴空间引力波探测多学科创新引智基地获批复。2020年10月22日,国家航天局批复同意依托中山大学成立“国家航天局引力波研究中心”。12月31日,“天琴前沿科学中心”获教育部正式批复立项建设(增强出版:附图30)。2021年2月,天琴计划教育部重点实验室建设通过教育部专家组验收。继而,天琴中心开展地月测距和卫星发射工作,获得全球领先科研成果(Luo et al., 2021; Zhang et al., 2021, 2022; Xiao et al., 2022a, 2022b; Zhou et al., 2022; Pi et al., 2023)。中山大学天琴计划成为国内知名的引力研究核心单位,为中国引力物理的永续发展奠定了扎实的基础。

2.6 无线电物理初期发展

2.6.1 无线电物理研究 1958年,中山大学物理学系成立了无线电物理教研组(室),创办了无线电物理学科方向。50年代末,教研室主要开展顺磁共振波谱仪、微波参量放大器的研制和微波量子电子学的基本研究(林貽堃等,1954)。

1960年,林貽堃等开展了微波顺磁共振波谱的研究,并于1964年研制成功顺磁共振波谱仪,在该谱仪中采用了先进的小型开放式谐振腔和行波式慢波结构,谱仪的灵敏度达到当时的国际先进水平。60年代初,王良中、冯镇业等研制成功小型的晶体管核磁共振测场仪。林貽堃的论文《圆形截面波导中波导微扰对波型稳定性的影响》在1962年全国电子学会上宣读。谭学良、翁心光的论文《屏蔽式微带波导的损耗最佳特性阻抗及尺寸》,发表在《中山大学学报(自然科学版)》1961年第4期。谭学良的论文《超临界频段内面接合型晶体管振荡器的相角补偿》,发表在《中山大学学报(自然科学版)》1962年第3期(冯秉铨等,1958;谭学良等,1961;谭学良,1962)。微波研究一直持续到20世纪80年代。

2.6.2 量子电子学研究 1963年,无线电电子学教研室开展“量子电子学”研究。无线电物理教研组(室),在微波量子放大器、量子电子学物理基础方面取得较好的成果,建成了顺磁共振实验室,制成了灵敏度为 10^{-11} 克分子D.P.P.H的自动记录顺磁共振波谱仪;进行了 1.25^{-3} cm微波量子放大器系统的设计、腔设计加工及频率校准工作;完成两种高Q表面波谐振腔的系统研究,得到一定的成果;研究了开放式、半开放式梳形慢波结构,并用于行波式波谱仪上。

1964年,林貽堃、罗桂祥、郑兴世、张光昭等研制成功“自动记录综合型顺磁共振波谱仪”(叶衍趣,1988)。“顺磁共振谱仪”被选送参加了1965年在北京举办的“高教部科技成果展览会”和“全国科技成果展览会”。1964年8月,林貽堃、刘云梯等成功研制了体积小、Q值高,且透光性能好的“介质加载开放式谐振腔”。林貽堃等(1965)的《行波式波谱仪》,发表在《中山大学学报(自然科学版)》1965年第1期。

张光昭(1965)的《用顺磁共振法测定顺磁单晶的晶轴》,发表在《中山大学学报(自然科学版)》1965年第1期。(林貽

堃等(1965)的《波导—介质表面波谐振腔》,发表在《中山大学学报(自然科学版)》1965年第4期。谭学良等(1965)的《雪崩晶体管振荡电路的实验研究》,发表在《中山大学学报(自然科学版)》1965年第4期。

2.6.3 雷达与微波技术研究 1970年,张光昭等参加省科技局下达的雷达小型化和微波技术研究,教研室负责微波发射和接收部分的小型化问题研究,1971年底完成。此后,教师科研转为微波固体电子学方向。从1974年开始,无线电物理教研室陈云凤等(1978)开展省科委项目“电子计算机控制纹版自动轧孔机”研究。

从1975年下半年开始,无线电物理教研室苏浩松、骆永健等开展了省科技局项目(1975年省重点项目)“水下激光测距显像仪”研究。1976年开始,无线电物理教研室开展“专用闭路电视设备及微光、快速电视摄像技术”研究;参加四机部、省电子局项目“毫米波外差式频率计”新产品的试制研究;开展图像信息处理数字化固体化研究,图像信息数字处理与数字电视制式的基本研究;固体摄像技术与显示技术的研究。同时期,还开展了电视技术的推广应用:水下激光测距、显像及微光电视;显微电视;文字和科技情报的传递;自控用工业电视;电视电话及广播电视;图像计量等。

2.6.4 亚毫米波激光研究 1978年,物理学系成立亚毫米波研究室,开展“亚毫米波物理与技术的研究”。5月,亚毫米波研究室林貽堃、丘秉生、郑兴世开展“HCN激光器及亚毫米波波长测量”研究,产生的337和311 μm 激光是当时热门的THz激光,该成果成为我国激光领域的开创性成就,被编入《中国激光史概要》一书中。1979年,林貽堃、张光昭等开展亚毫米波激光、亚毫米波准光技术、亚毫米波波谱、亚毫米波频率精密测量的研究。林貽堃、丘秉生、郑兴世研制成功国内第一台HCN亚毫米波激光器,并很快在国内研究等离子体的单位推广应用(林貽堃等,1981a,1981b,1981c,1981d;丘秉生等,1983;亚毫米波研究室,1978)。

1979年,无线电专业从物理学系分离,成立电子系。

3 中山大学物理学学科现状和发展趋势

3.1 物理学院

物理学院位于中山大学广州校区南校园(康乐园)。2015年12月,按照学校学科发展布局,依托物理学一级学科成立物理学院。在学科建设方面,学院“面向学术前沿、面向国家重大战略需求、面向国家和区域经济社会发展”,坚持“入主流、立潮头、走出去”,深化“3+3+3”学科发展布局,巩固理论物理、凝聚态物理、光学3个传统优势学科发展,推进软物质物理、粒子物理、能源物理3个特色新兴方向,统筹中子谱仪、200 TW超快飞秒激光器系统、中微子相干散射探测系统3个科研平台建设。在师资队伍方面,学院注重人才引进。现有专任教师99人,其中各类国家级高层次人才占比达1/3,一批青年科学家在量子光学、拓扑材料物理等领域做出了具有特色的工作(Yan et al., 2016, 2017, 2018; Yan, 2019; Kheirkhah et al., 2020; Xiang et al., 2023; Wang et al.,

2023, 2024;)。在科学研究方面,积极参与学术共同体,尤其在粒子物理和高等物理方面,成果丰富。学院积极面向国家战略需求开展工作,目前拥有王雪华、郑跃等一批承担国家重大研究计划的科学家(Liu et al., 2017, 2022, 2023; Wu et al., 2021; Li et al., 2023)。董建文以拓扑光学研究成果荣获青年科学家称号。王雪华教授、刘进教授等在量子光学及拓扑光学的研究成果两次入选“中国光学十大进展”(Li et al., 2019, 2021, 2022; Wang et al., 2022)。王猛教授的镍氧化物高温超导的研究成果入选由两院院士评选的2023年中国十大科技进展(Sun et al., 2023)。拥有全国重点实验室1个(光电材料与技术国家重点实验室,共建),广东省重点实验室1个,广东省工程技术研究开发中心1个,校级研究所/中心3个,“国之重器”高能直接几何非弹性中子散射飞行时间谱仪已正式揭牌,拥有物理学博士后流动站、国家理科基础科学研究和人才培养基地、物理学公共科研平台。学院与众多著名学府、学术机构和学者建立了广泛的学术交流与人才培养合作,与多家高新科技企业开展产学研合作,帮助解决材料、能源、先进制造、高端芯片等服务国家战略需求的关键问题。

3.2 物理与天文学院

物理与天文学院位于中山大学珠海校区,于2015年成立,已吸引多位国内外优秀专家学者加盟,师资力量迅速壮大。学院现有专任教师80余人(教授33人),其中两院院士1人,国家杰出青年科学基金获得者3人,优秀青年基金获得者2人,国家高层次人才计划10人,中山大学“百人计划”引进近70人,还有专职研究人员(含博士后)近30人。学院本着对珠海校区“提增量”的定位,以及发展深海、深空、深地、深蓝等学科群的总体布局,已经初步形成“123”的中长期发展规划,即依托天琴空间引力波探测计划、中国空间站工程巡天望远镜粤港澳大湾区科学中心两大国家级研究平台和广东省量子精密测量与传感重点实验室一个省部级平台,引领中山大学珠海校区的“深空”1个学科群,支撑物理学和天文学2个一级学科,重点发展以理论物理为支撑的引力物理、天体物理、量子物理3个研究方向,为此学院组建了理论物理团队、天琴团队、天文团队、量子物理团队等4个研究团队。

天琴计划是罗俊院士及其团队提出的我国主导的空间引力波探测计划。天琴将打开0.1 mHz~1 Hz频段的引力波的探测窗口,主要探测对象包括了从几倍太阳质量的恒星级黑洞到星系中心高达上千万倍太阳质量的大质量黑洞、银河系中大量的致密双星、邻近宇宙空间的恒星级双致密星,计划提出了“0123计划”技术路线图来稳步推动一系列核心关键技术的发展,其开展将推动我国高精度空间探测载荷及卫星技术跨越式发展,在各个阶段所取得的技术进步也在地球重力场测量等方面有重要的应用,具有重大的战略价值(Luo et al., 2016; Mei et al., 2020, 2021; Xiao et al., 2022a, 2022b; Zhou et al., 2022; Zhang et al., 2022; Pi et al., 2023)。

巡天中心是发挥好中国空间站巡天空间望远镜挖掘科学价值的研究实体。巡天空间望远镜作为空间站工程最重要的空间科学设施,是我国迄今为止规模最大、指标最先进的

空间天文望远镜,具有强大的国际竞争力。中国空间站工程巡天望远镜粤港澳大湾区科学中心依托中山大学物理与天文学院建设,将充分发挥学校学科和人才优势,以港澳为纽带,凝聚大湾区天文科研力量和国内外优秀科学团队高效开展天文科学交流与研究,助力学校天文科学水平迈向国际一流,服务国家重点区域发展战略。

量子物理相关团队将致力于打造具有国际影响力的原子分子光物理研究高地,实现原子分子光物理与量子技术的融合交叉,取得原创性的基础科学重大成果,推动量子技术服务国民经济和国家战略需求,支撑以天琴计划为代表的满足国家战略需求的“深空深地深海”研究,培养优秀量子科技人才。

3.3 理学院

理学院位于中山大学深圳校区,成立于2021年2月。根据中山大学建设世界一流大学的战略目标,理学院秉承“德才双修、顶天立地,知行合一、勇立潮头”的学院文化,开展“数学”和“物理学”两个一级学科建设,为深圳校区学科布局和发展提供支持,支撑伽马光子对撞机及综合粒子设施等大科学装置建设,为国家重大战略需求和粤港澳大湾区建设服务。学院专任教师100%具有博士学位,海外教育工作经历教师占比60%。预计未来5年专任教师将达到100人规模,依托学术团队培养“数学”和“物理学”博士后及科研人员。学院致力于基础研究、应用交叉和科技研发并重,现已获批广东省教育厅2024年度广东省普通高校重点科研平台,联合东莞散裂中子源获批广东省重点实验室,累计立项的国家、省市等各类科研项目约40项,其中教育部重大项目1项,面上项目13项,青年项目15项,横向项目10项等;国家级人才项目1项、省级重大人才项目2项;发表高水平论文50余篇;申请国家(含国际)发明专利13余项,获批专利4项。理学院将拥

有120 MeV直线型加速器、200 TW激光器等大型设备支持基础研究;与美国、法国、瑞士等国家以及港澳台地区的众多著名学府、学术机构(如ATLAS、AMS、BES I合作组合作组)和学者建立了广泛的学术交流关系。学院正在建设中的直线型加速器将提供VHEE 闪存治疗医学物理实验、电子束辐照材料、农业、医学等多学科交叉研究平台;超强场激光器将开展新加速原理、激光聚变中关键物理问题及激光等离子体不稳定性的深入研究。

4 结 语

中山大学物理学科历经百年办学路程,从建校之初的科学教育者的培养、新中国专业人才培养和科学研究发展、改革开放面向国家需求和服务社会的基础科学教学和研究人才培养,到21世纪拔尖创新人才培养和面向国家重大需求开展科学研究工作。中山大学物理学科办学规模从石牌的一个物理学系和数学与天文系的一部分,发展到目前布局广州、深圳、珠海三校区的物理学科大格局,学科研究也发展到凝聚态物理、引力物理、理论物理、光学、量子物理、粒子物理、等离子物理、宇宙学、软物质与能源物理等二级学科研究领域。在教育部学科评估中,中山大学物理学科评级为A-,居2022—2023年USNews世界学科排名第104名,2023年软科世界一流学科排名第76位,2024年3月列ESI榜单全球第176位(前1.897%)。有理由相信,未来的中山大学物理学科在天琴计划、巡天中心、中子谱仪、TW强激光平台等大型设置支撑下,在凝聚态物理、引力物理、光学、粒子物理、量子物理学科方向将产生更有影响力的成果,为国家和粤港澳大湾区的发展做出更大的贡献。

参考文献:

鲍诚光, 1973. N体散射的非耦合积分方程组和截面公式[J]. 科学通报, (2): 75-76.

鲍诚光, 1980. 利用光学定理讨论以道波函数标志的多体系统的完备系[J]. 高能物理与核物理, (5): 623-625.

鲍诚光, 李先卉, 1988. 奇偶波干涉对核子关联的影响[J]. 高能物理与核物理, (3): 425-428.

曾文光, 杜仲廉, 冯戢云, 等, 1990. 88~623K区间Bi型超导块相变行为的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), (1): 105-109.

曾文光, 林长净, 冯戢云, 1991. Te对高温超导陶瓷YBa₂Cu₃O₇超导电性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 153-156.

陈飞达, 邝立人, 李燮均, 1959. 铝线(直径0.77mm-0.33mm)的电焊接[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 67-72.

陈焕鑫, 许煜寰, 1981. 铋青铜结构的新的铁电单晶——(K_{1-x}Na_x)_{0.4}(Sr_{1-y}Ba_y)_{0.8}Nb₂O₆[J]. 物理, (12): 730-731.

陈焕鑫, 许煜寰, 1982a. 铋酸铅铋铁电单晶的生长和物理性质[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 59-62.

陈焕鑫, 许煜寰, 1982b. 铋青铜型结构铁电体(K_{1-x}Na_x)_{0.4}(Sr_{1-y}Ba_y)_{0.8}Nb₂O₆系列的单晶生长及铁电畴观察[J]. 硅酸盐学报, (4): 406-411.

陈焕鑫, 许煜寰, 1982c. 铁电单晶Pb_xBa_{1-x}Nb₂O₆族的生长和物理性质[J]. 人工晶体, (Z1): 48.

陈嘉言, 1982. 引力波天线减振装置及其特性[J]. 中山大学学报(自

然科学版), (3): 98-99.

陈嘉言, 管同仁, 胡恩科, 1982. 用扭摆观测1982年1月10日月全食引力效应[J]. 自然杂志, (8): 638-639.

陈嘉言, 管同仁, 丘仲兴, 等, 1979. 引力波探测器结构设计[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 140-141.

陈嘉言, 管同仁, 于珀, 1980. 引力波天线Q值测试仪[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 42-51.

陈嘉言, 陶福臻, 郑庆璋, 等, 1975. 减振与减冲击[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 128-146.

陈健, 李伟良, 王万伦, 等, 1985. 一种实用的光学多道分析器[J]. 应用激光, (1): 45-48.

陈云凤, 1978. 电子计算机控制纹版自动轧孔机研制[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 125-128.

陈宗蕴, 周义昌, 黄念宁, 1985. 规范变换与铁磁链方程的求解[J]. 武汉大学学报(自然科学版), (4): 37-40.

杜仲廉, 段鸿, 张雪强, 1987. Bi-Sr-Ca-Cu-O系超导电性的探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), (1): 1-2.

冯秉铨, 谭学良, 1958. 关于折线法的准确度及其修正公式[J]. 电信科学, (7): 44-48.

高温超导材料科研组, 1987. 钡钨铜氧化物陶瓷超导电性的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 99-100.

- 高兆兰,汪河洲,源永安,等,1984.用稳态与时间分辨光谱研究新的激光染料及其溶剂效应[J].中山大学学报(自然科学版), (4): 55-61.
- 葛庭燧,张进修,1965. Al-0.5%Cu合金中表现反常振幅效应的低频位错内耗[J].物理学报, (10): 1711-1724.
- 葛庭燧,张进修,1966. 铝-0.5%铜合金中反常振幅效应内耗峰的进一步实验和位错弯结气团模型[J].物理学报, (1): 71-82.
- 葛庭燧,张志舜,张进修,1966. 铝-0.1%镁合金中表现反常振幅效应的低频位错内耗峰[J].物理学报, (3): 270-280.
- 郭硕鸿,1960. π 介子的辐射衰变[J].物理学报, (5): 299-304.
- 郭硕鸿,1973. 导电介质的辐射[J].中山大学学报(自然科学版), (1): 72-78.
- 郭硕鸿,1982. 格点规范理论[J].华中师院学报(自然科学版), (3): 30-54, 62.
- 郭硕鸿,刘金明,陈启洲,1984. 纯格点规范场相变的变分分析[J].中山大学学报(自然科学版), (4): 48-54.
- 何锦昌,李冕丰,1981. 中子共振参数的面积分析[J].中山大学学报(自然科学版), (4): 20-27.
- 胡恩科,管同仁,唐孟希,1983. 用精密扭摆观测1982年12月30日月全食引力效应[J].自然杂志, (12): 948-949.
- 胡连,郭硕鸿,1986. 强子质量谱的变分研究[J].高能物理与核物理, (3): 288-296.
- 黄学雄,陈芝芬,杜仲康,等,1986a. 铁电体性能的低温研究[J].湖北师范学院学报(自然科学版), (2): 1-4.
- 黄学雄,陈芝芬,李景德,等,1986b. 铈酸锂在15至573K温度范围内的电学性质[J].无机材料学报, (3): 217-222.
- 黄学雄,陈芝芬,沈文彬,等,1987. LiNbO_3 晶体室温—300°C相变的研究[J].湖北师范学院学报(自然科学版), (2): 49-54.
- 黄祯启,1983. 非共线二次谐波波发生法及超短光脉冲时间宽度的测量[J].中山大学学报(自然科学版), (3): 37-44.
- 赖锡安,关祖杰,张纯祥,等,1984. 微型计算机在环境辐射测量中的应用[J].环境科学与技术, (1): 48-50.
- 李芳昱,唐孟希,1987. 空间阵列的狭窄波束型引力辐射[J].物理学报, (12): 1570-1582.
- 李芳昱,唐孟希,李一川,2000. 在一静态磁场中强电磁波束对引力波的谐振响应[J].中国科学(A辑), (9): 847-855.
- 李华钟,1964. 费米子Regge极迹的解析性和阈行为[J].中山大学学报(自然科学版), (3): 326-349.
- 李华钟,1965a. ρ 介子Regge极迹与 π 介子电磁形式因子[J].物理学报, (10): 1825-1828.
- 李华钟,1965b. 费米子Regge极迹的解析性和阈行为[J].物理学报, (7): 1387-1405.
- 李华钟,冼鼎昌,1977b. 磁单极的非相对论理论引论[J].中山大学学报(自然科学版), (4): 73-91.
- 李华钟,冼鼎昌,郭硕鸿,1975. 关于非亚贝尔规范群的对偶荷(单磁荷)问题[J].中山大学学报(自然科学版), (3): 7-14.
- 李华钟,冼鼎昌,郭硕鸿,1976. 关于非阿贝尔规范群的对偶荷问题——一个对单磁荷的讨论[J].物理学报, (6): 507-513.
- 李华钟,冼鼎昌,郭硕鸿,1977a. 非阿贝尔规范场的类粒子解[J].物理学报, (6): 544-549.
- 李华钟,冼鼎昌,郭硕鸿,1977c. 关于非亚贝尔规范群的(II、III)对偶荷(单磁荷)问题[J].中山大学学报(自然科学版), (1): 26-39.
- 李华钟,冼鼎昌,郭硕鸿,1977d. 非亚贝尔规范场的类粒子解[J].中山大学学报(自然科学版), (2): 48-53.
- 李华钟,冼鼎昌,郭硕鸿,1979a. 关于非亚贝尔规范群的对偶荷(磁单极)问题[J].中国科学, (3): 247-260.
- 李景德,1984. 铁电陶瓷中的驻极体效应[J].中山大学学报(自然科学版), (2): 23-28.
- 李景德,1986. 二维有限晶格振动的自由边界矩阵[J].中山大学学报(自然科学版), (2): 58-63.
- 李景德,何堤,1986. 压电陶瓷的长时间弛豫效应[J].硅酸盐学报, (2): 140-146.
- 李景德,雷德铭,1985a. 铁电测量中的亚微观信号[J].物理, (3): 171-173, 190.
- 李景德,雷德铭,沈文彬,1984. 热电系数及其精确测量方法[J].物理, (7): 407-409.
- 李景德,王冠澄,何堤,1985b. 铁电陶瓷中的弛豫效应[J].中山大学学报(自然科学版), (1): 8-14.
- 李文冲,余振新,林位株,1980. 采用一种新型声光调制器的锁模氩离子激光器[J].中山大学学报(自然科学版), (3): 107-108.
- 李先枢,1982. 标量光场平面屏衍射的矩阵理论——(II)衍射积分[J].中山大学学报(自然科学版), (1): 43-55.
- 李先枢,高燕球,1988. 多环端镜激光谐振腔的探讨[J].中山大学学报(自然科学版), (1): 61-70.
- 李燮均,池佳良,余善宽,1964. 再结晶Zn中的位错蚀斑f[J].中山大学学报(自然科学版), (2): 189-194, 282-283.
- 李燮均,郑兴世,程啟诚,1960. Zn-Al合金形变的一个反常现象[J].中山大学学报(自然科学版), (4): 25-28.
- 李修宏,王运新,1965. 少量杂质对铝形变过程中电阻率变化的影响[J].中山大学学报(自然科学版), (2): 190-197.
- 李哲吟,徐家进,李先枢,1988. 稳定谐振腔中横模特性的准几何近似的适用性研究(I)—— $G_1=G_2=0.5$ [J].物理学报, 1988.
- 梁振斌,马莹莹,谢沧,等,1978. 高级受激喇曼散射的观察[J].激光, (Z1): 22.
- 林光明,方衡,张进修,等,1991. 部份熔融YBCO超导体的载流特性[J].中山大学学报(自然科学版), (3): 1-8.
- 林光明,黄元士,张进修,等,1993. 形状记忆材料中二类相界面的研究[J].中山大学学报(自然科学版), (3): 29-34.
- 林光明,张进修,黄清珠,1988. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}(9-x)$ 在烧结过程中的四方 \rightarrow 正交转变与超导电性[J].中山大学学报(自然科学版), (3): 116-119.
- 林光明,宋梓英,1995. CuZnAl合金热循环效应的正电子湮没研究[J].中山大学学报(自然科学版), (1): 102-105.
- 林位株,张永良,王万伦,等,1983. 聚合效应对四溴荧光素水溶液荧光寿命的影响[J].中山大学学报(自然科学版), (1): 31-34.
- 林香婷,潘卓怀,伍钧镨,等,1978. 微米激光斑[J].激光, (Z1): 162.
- 林贻坤,刘云梯,1965. 波导——介质表面波谐振腔[J].中山大学学报(自然科学版), (4): 454-467.
- 林贻坤,丘秉生,张光昭,1965. 行波式波谱仪[J].中山大学学报(自然科学版), (1): 42-51.
- 林贻堃,冯秉铨,1954. 测定强力管静态特性的一个新方法[J].物理学报, (1): 43-56.
- 林贻堃,丘秉生,1981b. 准光技术在毫米和亚毫米波测量技术中的应用[J].中山大学学报(自然科学版), (2): 64-68.
- 林贻堃,丘秉生,郑兴世,1981a. HCN(氰化氢)亚毫米波激光器的研制[J].中山大学学报(自然科学版), (2): 60-63.
- 林贻堃,丘秉生,郑兴世,1981c. HCN激光器及亚毫米波波长的测量[J].激光, (7): 32-34+59.

- 林贻堃, 丘秉生, 郑兴世, 1981d. 亚毫米波法布里-珀罗干涉仪的研制[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 40-44.
- 刘惠周, 李哲吟, 1989. Si(111)7×7 结构模型的稳定性研究[J]. 物理学报, (10): 1569-1577.
- 刘金明, 周义昌, 1984. 超导——铁磁性共存的平均场理论[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 72-79.
- 刘小伟, 张纯祥, 李冕丰, 等, 1996. 伽玛刀体模剂量分布的 Monte-Carlo 模拟[J]. 核技术, (6): 339-342.
- 刘小伟, 张纯祥, 罗达玲, 等, 1994. 离子径迹结构的 Monte-Carlo 模拟[C]//第九届全国核物理大会论文摘要汇编: 202.
- 卢世琪, 朱熙泉, 赵维勤, 等, 1981. Eikonal-Born 展开及其对大角度散射问题的应用[J]. 高能物理与核物理, (1): 121-126.
- 卢文, 姚起元, 区智, 等, 1979. 解 KdV 方程的微分几何方法[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 29-43.
- 罗蓓玲, 1962. 不稳定靶测量 πK 作用和 NAK 作用[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 9-11.
- 罗达玲, 关祖杰, 赖锡安, 等, 1985. 总谱能量法确定环境 γ 辐射场照射率[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 12-16.
- 罗达玲, 黄乃明, 张纯祥, 1992. LiF 热释光剂量计的剂量响应的研究[J]. 核技术, (1): 51-58.
- 罗达玲, 李冕丰, 张纯祥, 等, 1988. 丙氨酸 ESR 剂量计的剂量特性[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 50-54.
- 罗达玲, 张纯祥, 1995. 热释光剂量响应的非线性(英文)[R]. 中国核科技报告: 984-995.
- 罗向前, 陈启洲, 郭硕鸿, 1989. 带费米子 2+1 维 $SU(2)$ 群格点规范理论中的真空和手征对称性自发破缺[J]. 高能物理与核物理, (4): 328-333.
- 罗向前, 何宝鹏, 陈启洲, 等, 1988. 格点规范理论中的 $\Delta I=1/2$ 规则[J]. 高能物理与核物理, (4): 477-483.
- 莫党, 1989. Te 离子注入 GaAs 的穆斯堡尔谱研究[J]. 固体电子学研究与进展, (4): 381-383.
- 莫党, 潘士宏, SPICER W E, 等, 1983. 砷化镓上银和金膜的价带光电子谱[J]. 物理学报, (11): 1467-1470.
- 莫党, 张桂林, NIESEN L, 等, 1990a. 时间相关穆斯堡尔谱与 GaAs 的 ^{119m}Te 离子注入[J]. 物理学报, (2): 302-311.
- 莫党, 张桂林, NIESEN L, 等, 1990b. Ga_2Te_3 的 ^{129m}Te 穆斯堡尔谱[J]. 中山大学学报(自然科学版), (1): 110-114.
- 彭少麒, 1979. 硅表面热氧化缺陷的产生及增长[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 18-23.
- 彭少麒, 姚杰, 1964. 砷在锗中的扩散[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 350-357.
- 彭少麒, 姚杰, 许志良, 1965. 锗的阳极氧化[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 323-329.
- 彭少麒, 余秉才, 1981. 三氯乙烯参与氧化对 MOS 结构产生特性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 55-59.
- 丘秉生, 郑兴世, 罗锡璋, 1983. 亚毫米波球面镜 F-P 干涉仪[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 23-28.
- 史隆培, 1978. KDP 型晶体铁电相变的格林函数理论(I)[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 25-40.
- 谭学良, 1962. 超临界频段内面接合型晶体管振荡器的相角补偿[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 1-8.
- 谭学良, 苏浩松, 冯镇业, 1965. 雪崩晶体管振荡电路的实验研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 468-475.
- 谭学良, 翁心光, 1961. 屏蔽式微带波导的损耗、最佳特性阻抗及尺寸[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 7-15.
- 唐孟希, 李芳昱, 1997. 高频引力波对环形波导中电磁波的调制作用[J]. 物理学报, (2): 33-43.
- 唐孟希, 李芳昱, 赵鹏飞, 等, 2002. 引力波、引力波源和引力波探测实验[J]. 云南天文台台刊, (3): 71-87.
- 陶福臻, 何志强, 1984. 引力波对电磁场的作用与引力波的电磁探测的可能性[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 29-37.
- 王国宗, 田景发, 刘易成, 等, 1983. 1980年2月16日云南日全食引力效应观测[J]. 自然杂志, (4): 319-320.
- 吴詠时, 李华钟, 郭硕鸿, 1978. 关于一种 Yang-Mills 场的类粒子解[J]. 高能物理与核物理, (4): 371-373.
- 许煜寰, 陈焕鑫, 1983. 铁电晶体 $(\text{K}_{0.20}\text{Na}_{0.20}\text{Sr}_{0.60}\text{Ba}_{0.20})\text{Nb}_2\text{O}_6$ 全部电弹常数的测定[J]. 物理学报, (6): 705-712.
- 许煜寰, 陈焕鑫, 1985. 铁电单晶 $(\text{K}_x\text{Na}_{1-x})_{0.4}(\text{Sr}_y\text{Ba}_{1-y})_{0.8}\text{Nb}_2\text{O}_6$ 的光学性质和线性电光效应[J]. 物理学报, (7): 978-982.
- 许煜寰, 李仲荣, 李潮锐, 等, 1987. La、Li 置换的 Ba-Y-Cu-O 高 Tc 超导陶瓷材料[J]. 低温与超导, (3): 47-52.
- 亚毫米波研究室, 1978. 氰化氢(HCN)气体激光器研制简报[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 15.
- 姚杰, 1981. 激光脉冲使硼在硅中扩散[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 123-125.
- 叶衍趣, 1988. 博士生导师林贻堃教授[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 3.
- 余振新, 李庆行, 1981. 扫描法布里——珀罗干涉仪在设计上的考虑及其用于激光模谱的分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), (1): 45-49.
- 余振新, 源永安, 江河洲, 等, 1984. 几种紫外区新染料的光谱与激光特性[J]. 光学学报, (7): 621-627.
- 余正方, 郑裕芳, 杨绮琴, 1987. 电镀镍铁合金的穆斯堡尔谱学研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 99-103.
- 曾文光, 杜仲廉, 冯戢云, 等, 1990. 88 ~ 623K 区间 Bi 型超导块相变行为的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), (1): 105-109.
- 曾文光, 林长净, 冯戢云, 1991. Te 对高温超导陶瓷 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超导电性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 153-156.
- 张纯祥, 1974. 硫化镉辐射探测器的电极处理与辐射剂量特性的关系[J]. 中山大学学报(自然科学版), (1): 67-74.
- 张纯祥, 关祖杰, 1979. 用甄别 α 粒子的方法测定氡和(气土)子体产物的放射性浓度[J]. 中山大学学报(自然科学版), (3): 44-52.
- 张纯祥, 赖锡安, 罗达玲, 等, 1984. 带微型计算机的射线自动测量和数据处理装置[J]. 核技术, (5): 27-29+72-73.
- 张纯祥, 刘小伟, 陈燕, 等, 1994. 重离子径迹周围的径向剂量分布[J]. 辐射防护, (6): 401-406+415.
- 张纯祥, 罗达玲, 1982a. 氩钍子体浓度测量数据的微型计算机处理[J]. 核技术, (2): 22-25.
- 张纯祥, 罗达玲, 1982b. 最小二乘原理计算氩钍子体浓度[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 60-66.
- 张纯祥, 罗达玲, 1996. 粒子的径迹结构与径向剂量分布[J]. 核物理动态, (1): 3-7.
- 张光照, 1965. 用顺磁共振法测定顺磁单晶的晶轴[J]. 中山大学学报(自然科学版), (1): 52-56.
- 郑庆璋, 崔世治, 1980. 一种可调谐的引力波天线[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 52-56.
- 郑庆璋, 崔世治, 1982. 弹性天线本征频率温度效应的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), (1): 116-119.
- 郑裕芳, 1983. 磁相变状态下铁的同质异能移[J]. 中山大学学报(自

- 然科学版), (4): 69–75.
- 郑裕芳, 余正方, 卢敬业, 1983. 复杂穆斯堡尔谱解谱技术[J]. 核技术, (5): 19–20+26–75.
- 中山大学, 1979a. 引力理论及相对论天体物理讨论会在广州举行[J]. 中山大学学报(自然科学版), (1): 86.
- 中山大学, 1979b. 谈物理模型的局限性[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 142.
- 中山大学, 1987. 中山大学在高温超导研究中取得重要进展[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 117.
- 中山大学物理系引力波研究组, 1977. 衰减时间测定仪研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), (2): 54–64.
- 周义昌, 刘金明, 1983. 临界点附近超导体热力学位的单圈近似[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 85–90.
- 朱熙泉, 何祚庥, 赵维勤, 等, 1980. 多粒子体系的相对论 Glauber 展开式[J]. 科学通报, (11): 489–490.
- 朱梓英, 李景德, 1987. 铈酸锂单晶的内旋转和电子态[J]. 中山大学学报(自然科学版), (4): 38–42.
- CHANG C H, HAGEMANN G B, YAMAZAKI T, 1969. Excited states of ^{116}Sn populated by the $(\alpha, 2n)$ reaction[J]. Nucl Phys A, 134(1): 110–117.
- CHEN B, WEI Y, ZHAO T, et al, 2021. Bright solid-state sources for single photons with orbital angular momentum[J]. Nat Nanotechnol, 16: 302–307.
- CHEN L X, LIU X W, YOU R A, et al, 2006. Dosimetric analysis of a shielded applicator for nasopharyngeal carcinoma intracavitary brachytherapy: Monte Carlo calculation[J]. Med Phys, 33(3): 761–769.
- CHEN S W, WANG X T, CHEN L X, et al, 2009. Monte Carlo evaluations of the absorbed dose and quality dependence of in radiotherapy photon beams[J]. Med Phys, 36(10): 4421–4424.
- CHEN W J, HANG Z H, DONG J W, et al, 2011. Observation of backscattering-immune chiral electromagnetic modes without time reversal breaking[J]. Phys Rev Lett, 107(2): 023901.
- CHEN X D, DENG W M, SHI F L, et al, 2019. Direct observation of corner states in second-order topological photonic crystal slabs[J]. Phys Rev Lett, 122(23): 233902.
- CHEN Y, HE X T, CHENG Y J, et al, 2021. Topologically protected valley-dependent quantum photonic circuits[J]. Phys Rev Lett, 126(23): 230503.
- DENG W M, CHEN Z M, LI M Y, et al, 2022. Ideal nodal rings of one-dimensional photonic crystals in the visible region[J]. Light Sci Appl, 11(1): 134.
- DONG J W, CHANG M L, HUANG X Q, et al, 2015. Conical dispersion and effective zero refractive index in photonic quasicrystals[J]. Phys Rev Lett, 114(16): 163901.
- FAN Z B, QIU H Y, ZHANG H L, et al, 2019. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible[J]. Light Sci Appl, 8: 67.
- HAN J, ZHUANG Y D, LIU X W, et al, 2020. Fast confirmation of the incident electron energy by simulation for medical linac[J]. He Jishu/nuclear Techniques, 43(1): 13–19.
- HE L, ZHU J, WANG X, et al, 2023. Preliminary study on dosimetry characteristics of a novel cylindrical dose verification system[J]. J Appl Clin Med Phys, 24(10): e14138.
- HEPTING M, 2023. Elite superconductor club has a new member[J]. Nature, 621: 475–476.
- HSIUNG H, SHI L P, SHEN Y R, 1984. Transient laser-induced molecular reorientation and laser heating in a nematic liquid crystal[J]. Phys Rev A, 30(3): 1453–1460.
- JIN G H, CHEN L X, DENG X W, et al, 2013. A comparative dosimetric study for treating left-sided breast cancer for small breast size using five different radiotherapy techniques: Conventional tangential field, filed-in-filed, tangential-IMRT, multi-beam IMRT and VMAT[J]. Radiat Oncol, 8: 89.
- KHEIRKHAH M, YAN Z, NAGAI Y, et al, 2020. First- and second-order topological superconductivity and temperature-driven topological phase transitions in the extended Hubbard model with spin-orbit coupling[J]. Phys Rev Lett, 125(1): 017001.
- KHURI N N, 1963. Crossing-symmetric watanabe-sommerfeld transformation[J]. Phys Rev Lett, 10(9): 420–423.
- KHURI N N, UDGAONKAR, et al, 1963. Nucleon as a Regge Pole and the Phase Shifts[J]. Physical Review Letters, 10(5): 172–176.
- LI F Y, TANG M X, LI Y C, 2001. Resonant response of a strong electromagnetic wave beam to a gravitational wave in a static magnetic field[J]. Sci China (Ser A), (2): 249–258.
- LI W, LIU R, LI J, et al, 2023. Highly efficient single-exciton strong coupling with plasmons by lowering critical interaction strength at an exceptional point[J]. Phys Rev Lett, 130(14): 143601.
- LI X, MA J, LIU S, et al, 2022. Efficient second harmonic generation by harnessing bound states in the continuum in semi-nonlinear etchless lithium niobate waveguides[J]. Light Sci Appl, 11(1): 317.
- LIANG H, LIN Q, XIE X, et al, 2018. Ultrahigh numerical aperture metalens at visible wavelengths[J]. Nano Lett, 18(7): 4460–4466.
- LIU J, SU R, WEI Y, et al, 2019. A solid-state source of strongly entangled photon pairs with high brightness and indistinguishability[J]. Nat Nanotechnol, 14: 586–593.
- LIU L, CHEN W, ZHENG Y, 2022. Flexoresponses of synthetic antiferromagnetic systems hosting skyrmions[J]. Phys Rev Lett, 128(25): 257201.
- LIU L, CHEN W, ZHENG Y, 2023. Emergent mechanics of magnetic skyrmions deformed by defects[J]. Phys Rev Lett, 131(24): 246701.
- LIU R, ZHOU Z K, YU Y C, et al, 2017. Strong light-matter interactions in single open plasmonic nanocavities at the quantum optics limit[J]. Phys Rev Lett, 118(23): 237401.
- LIU S, WEI Y, LI X, et al, 2021. Dual-resonance enhanced quantum light-matter interactions in deterministically coupled quantum-dot-micropillars[J]. Light Sci Appl, 10(1): 158.
- LIU Z J, XU Y, LIN Y, et al, 2019. High-Q quasibound states in the continuum for nonlinear metasurfaces[J]. Phys Rev Lett, 123(25): 253901.
- LUO J, AI, et al, 2021. A brief introduction to the TianQin project[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 60(1/2): 1–19.
- LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al, 2016. TianQin: A spaceborne gravitational wave detector[J]. Class Quantum Grav, 33

- (3): 035010.
- LUO Z H, HU X W, WANG M, et al, 2023. Bilayer two-orbital model of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ under pressure[J]. *Phys Rev Lett*, 131(12): 126001.
- MEI J W, BAI Y Z, BAO J H, et al, 2021. Corrigendum to: The TianQin project: current progress on science and technology[J]. *Prog Theor Exp Phys*, 2021(5): 059201.
- MEI J, BAI Y Z, BAO J, et al, 2020. The TianQin Project: Current progress on science and technology [EB/OL]. arXiv: 2008.10332. <http://arxiv.org/abs/2008.10332>.
- PI X H, LIU Q, XU J H, et al, 2023. Continuous charge management scheme for TianQin[J]. *Classical Quant Grav*, 40(3): 035005.
- QIAN Z, LI Z, HAO H, et al, 2021. Absorption reduction of large Purcell enhancement enabled by topological state-*led* mode coupling[J]. *Phys Rev Lett*, 126(2): 023901.
- RAO M, SHI F, RAO Z, et al, 2024. Single photon emitter deterministically coupled to a topological corner state[J]. *Light Sci Appl*, 13(1): 19.
- SHE W L, LEE K K, LEE W K, 1999. Observation of two-dimensional bright photovoltaic spatial solitons[J]. *Phys Rev Lett*, 83(16): 3182-3185.
- SHE W L, LEE K K, LEE W K, 2000. All optical quasi-steady-state photorefractive spatial solitons [J]. *Phys Rev Lett*, 85(12): 2498-2501.
- SHE W L, YU J H, FENG R H, 2008. Observation of a push force on the end face of a nanometer silica filament exerted by outgoing light[J]. *Phys Rev Lett*, 101(24): 243601.
- SUN H, HUO M, HU X, et al, 2023. Signatures of superconductivity near 80 K in a nickelate under high pressure [J]. *Nature*, 621(7979): 493-498.
- TANG G J, CHEN X D, SUN L, et al, 2024. Broadband and fabrication-tolerant 3-dB couplers with topological valley edge modes [J]. *Light Sci Appl*, 13(1): 166.
- WANG B, NORI F, XIANG Z L, 2024. Quantum phase transitions in optomechanical systems[J]. *Phys Rev Lett*, 132(5): 053601.
- WANG H Z, ZHENG X G, ZHAO F L, et al, 1995. Superradiance of high density Frenkel excitons at room temperature[J]. *Phys Rev Lett*, 74(20): 4079-4082.
- WANG H, TANG G, HE Y, et al, 2022. Ultracompact topological photonic switch based on valley-vortex-enhanced high-efficiency phase shift[J]. *Light Sci Appl*, 11(1): 292.
- WANG S, WANG X H, 2008. Comment on "spontaneous-emission rate in microcavities: Application to two-Dimensional Photonic crystals"[J]. *Phys Rev Lett*, 101(7): 078901.
- WANG W, GAO W, CHEN X, et al, 2020. Moiré fringe induced gauge field in photonics[J]. *Phys Rev Lett*, 125(20): 203901.
- WANG Y, REN Y, LUO X, et al, 2022. Manipulating cavity photon dynamics by topologically curved space [J]. *Light Sci Appl*, 11(1): 308.
- WANG Z, ZENG X T, BIAO Y, et al, 2023. Realization of a Hopf insulator in circuit systems[J]. *Phys Rev Lett*, 130(5): 057201.
- WU Y S, LI H Z, 1988. Observable effects of the quantum adiabatic phase for noncyclic evolution[J]. *Phys Rev B Condens Matter*, 38(16): 11907-11910.
- WU Y, WEN H, CHEN W, et al, 2021. Microdynamic study of spin-lattice coupling effects on skyrmion transport[J]. *Phys Rev Lett*, 127(9): 097201.
- XIAN D C, GUO S H, LI H Z, 1979. On the problem of dual charge (magnetic monopole) in non-abelian gauge groups[J]. *Sci China (Ser A)*, (2): 149-167.
- XIANG Z L, OLIVARES D G, GARCÍA-RIPOLL J J, et al, 2023. Universal time-dependent control scheme for realizing arbitrary linear bosonic transformations [J]. *Phys Rev Lett*, 130(5): 050801.
- XIAO C Y, BAI Y Z, LI H Y, et al, 2022b. Drag-free control design and in-orbit validation of TianQin-1 satellite[J]. *Classical Quant Grav*, 39(15): 155001.
- XIAO C Y, CANUTO E, HONG W, et al, 2022a. Drag-free design based on Embedded Model Control for TianQin project[J]. *Acta Astronaut*, 198: 482-494.
- YAN Z, 2019. Higher-order topological odd-parity superconductors [J]. *Phys Rev Lett*, 123(17): 177001.
- YAN Z, BI R, WANG Z, 2017. Majorana zero modes protected by a Hopf invariant in topologically trivial superconductors [J]. *Phys Rev Lett*, 118(14): 147003.
- YAN Z, SONG F, WANG Z, 2018. Majorana corner modes in a high-temperature platform[J]. *Phys Rev Lett*, 121(9): 096803.
- YAN Z, WANG Z, 2016. Tunable weyl points in periodically driven nodal line semimetals[J]. *Phys Rev Lett*, 117(8): 087402.
- ZHANG A, WANG, et al, 2017. Illumination optics in emerging naked-eye 3d display (invited review) [J]. *Prog Electromagn Res*, 159: 93-124.
- ZHANG C S, GAO T Q, CAO Y Y, et al, 2022. The facilities and performance of TianQin laser ranging station[J]. *Classical Quant Grav*, 39(12): 125005.
- ZHANG C X, 1995. Thindown in radiobiology: *E. coli* B/r, Bs-1, B. subtilis spores, and V-79 Chinese hamster cells [J]. *Nuc Sci Tech*, (2): 65-70.
- ZHANG X F, LUO C J, JIAO L, et al, 2021. Effect of Earth-Moon's gravity on TianQin's range acceleration noise[J]. *Phys Rev D*, 103(6).
- ZHANG Y, SHEN J, LI J, et al, 2023. High-speed electro-optic modulation in topological interface states of a one-dimensional lattice[J]. *Light Sci Appl*, 12(1): 206.
- ZHAO M, CHEN M K, ZHUANG Z P, et al, 2021. Phase characterisation of metalenses[J]. *Light Sci Appl*, 10: 52.
- ZHOU A N, CAI L, XIAO C Y, et al, 2022. Non-gravitational force measurement and correction by a precision inertial sensor of TianQin-1 satellite[J]. *Classical Quant Grav*, 39(11): 115005.
- ZHOU Y S, WANG X H, GU B Y, et al, 2006. Switching control of spontaneous emission by polarized atoms in two-dimensional photonic crystals[J]. *Phys Rev Lett*, 96(10): 103601.
- ZHUANG Z P, ZENG H L, CHEN X D, et al, 2024. Topological nature of radiation asymmetry in bilayer metagratings [J]. *Phys Rev Lett*, 132(11): 113801.