

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2025.04.008

量子百年,华彩华章:华人科学家的贡献与传承

彭鹏*,段茜,高策

山西大学 科学技术史研究所,山西 太原 030006

摘要:自量子力学诞生以来,华人科学家在这一领域屡有重大发现。本文梳理了从量子力学建立至中国改革开放前后这一历史阶段中,作出代表性贡献的华人科学家,依其学术活动年代和研究特点划分为三代,展现了中国早期量子研究从引入、承接走向原创与引领的完整发展轨迹。值此量子力学诞生百年之际,回顾华人量子科学家的历史贡献,不仅有助于更全面地认识他们在量子科学发展史中的角色,也有助于理解量子力学在中国的传播、吸收与再创造过程。

关键词:量子力学;华人科学家;量子研究;科学贡献;量子科技

中图分类号:O413.1; N09

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2025)04-0391-12

A century of quantum mechanics: contributions and legacy of Chinese scientists

PENG Peng*, DUAN Xi, GAO Ce

Institute for the History of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: Since the birth of quantum mechanics, Chinese scientists have repeatedly made significant discoveries in this field. This paper surveys the representative Chinese scientists from the establishment of quantum mechanics to the period before China's reform and opening-up, grouping them into three generations according to their academic eras and research characteristics, and thereby revealing a complete trajectory of China's early quantum research from introduction, originality and leadership. On the occasion of the centenary of quantum mechanics, reviewing the Chinese quantum scientists' historical contributions not only helps to gain a fuller understanding of their role in the history of quantum science, but also sheds light on the process of the transmission, the absorption, and the re-creation of quantum mechanics in China.

Keywords: quantum mechanics; Chinese scientists; quantum research; scientific contributions; quantum technology

0 引言

量子力学的建立,是20世纪科学史上最深刻的理论革命之一。自普朗克(M. Planck)提出能量量子假说、爱因斯坦(A. Einstein)发展光量子观念,到海森堡(W. Heisenberg)矩阵力学和薛定谔(E. Schrödinger)波动力学的相继形成,量子力学不仅重塑了人类对微观世界的认识,也为原子物理、分子物

理、核物理、粒子物理、凝聚态物理以及当代量子信息科学奠定了共同基础。

本文主要梳理为量子理论发展作出贡献的华人物理学家的相关研究,他们的工作涵盖以量子理论为基础、在二十世纪直接发展起来的多个核心分支。因此本文重点讨论原子与分子物理、X射线与光谱学、核物理、粒子物理、量子场论以及固体物理和半导体物理等领域的代表性人物。由于相关人物众

*通信作者

基金项目:山西省哲学社科规划课题(2025ZD007)

收稿日期:2025-11-02;修回日期:2025-12-01

多,本文侧重选取研究成果在国际物理学发展脉络中具有一定辨识度,或是在中国现代物理学学科建制与代际传承中具有重要意义的个案。

20 世纪上半叶,物理学的研究重心经历了明显转移。20 年代到 30 年代,原子物理尤其是光谱学是主;30 年代后期到 40 年代,核物理和宇宙线研究迅速兴起;二战以后,基本粒子物理、量子电动力学和量子场论成为国际理论物理前沿;50 年代以后,固态物理和半导体物理又逐渐发展为现代物理学的重要主流方向。华人科学家的研究轨迹与这些主流方向密切呼应,同时也受到历史条件的深刻影响。鉴于量子信息作为一门独立学科于 20 世纪 80 年代萌芽,并在 90 年代迅速崛起,本文将研究的时间范围界定为从量子力学建立之初至 1978 年改革开放

前后。

因此,本文将这一时间范围内量子力学发展历程中的华人科学家大体划分为三代,如表 1 所示。第一代主要指 20 世纪 20 年代到 30 年代出国留学并取得博士学位的早期学者,他们率先将量子概念与实验技术引入中国。第二代成长于抗战前后,在原子分子物理、统计物理、核物理、高能物理和量子场论等方向延续并拓展了前人的工作,在艰难环境中维系了中国现代物理学的学术传统。第三代则主要形成于中华人民共和国建国前后至改革开放前,这一代学者已经能够参与国际前沿研究,其中相当一部分在量子领域做出了重要成果,他们的研究方向既反映了当时量子力学发展的热点与趋势,也与国家的科技战略密切相关,开创了华人量子科研的新局面。

表 1 前三代华人量子科学家与 20 世纪物理学主流方向的协同演进

Table 1 Co-evolution of the first three generations of Chinese quantum scientists and the mainstream directions of 20th-century physics

阶段	同期国际物理学主流方向	华人科学家的主要回应方式	代表科学家	协同演进特征
第一代 (1920—1930s)	原子物理、光谱学、X 射线散射、晶体结构分析和早期量子理论,量子力学刚刚建立,实验验证与理论应用并行展开。	围绕 X 射线散射、原子光谱、分子光谱、氢原子精细结构、氢分子量子计算等展开研究	胡刚复、饶毓泰、叶企孙、吴有训、谢玉铭、顾静微、严济慈、王守竞、周培源	把量子概念、实验技术和近代物理教育体系引入中国。
第二代 (20 世纪 30 年代至中华人民共和国成立前后)	由原子物理逐步转向核物理、宇宙线研究、介子理论、统计物理和早期量子场论。二战推动核科学迅速成为物理学前沿和国家战略领域。	研究方向由原子、分子与统计物理扩展到核物理、宇宙线、高能物理和量子场论;在中微子探测设想、正负电子对产生、 β 衰变、宇称不守恒实验验证、非平衡统计物理等方面做出重要贡献。	吴大猷、束星北、王竹溪、张宗燧、王明贞、王承书、彭桓武、马仕俊、胡宁、朱洪元、余瑞璜、任之恭、赵忠尧、王淦昌、张文裕、何泽慧、吴健雄	在战争与迁徙环境中维系并拓展中国现代物理传统。
第三代 (1950—1970s)	二战以后,基本粒子物理、量子电动力学、量子场论和标准模型相关问题成为国际理论物理前沿;50 年代以后,固态物理、半导体物理和凝聚态物理逐渐成为现代物理学的重要主流方向。	在非阿贝尔规范场、宇称不守恒、可解量子场论模型、 J/ψ 粒子、交叉分子束、晶格动力学、半导体与表面物理、核武器理论设计和高能散射理论等方面取得突破,并获得诺贝尔奖。	杨振宁、李政道、杨立铭、周光召、何祚庥、戴元本、郝柏林、丁肇中、李远哲、黄昆、谢希德	一方面进入国际量子理论和高能物理前沿,另一方面服务国家核科学与重大工程。

1 第一代 引进量子概念

20 世纪初,量子理论正萌芽于欧美,华人留学生开始把它带回祖国。李复几是第一位获得物理学博士学位的中国人^[1],他在博士论文中,通过钠原子火焰光谱实验,否定了当时流行的光谱发射中心说,从而揭示了光谱线的发射机制。此后,李耀邦、颜任光等人也相继获得物理学博士学位,为中国物理学的发展奠定了基础。

1.1 实验原子物理与光谱学研究

真正意义上参与并推动量子力学相关研究的一

代中国物理学者,主要出现在 20 世纪 20 年代。这一时期,X 射线散射、原子光谱以及晶体结构分析等方向,成为量子理论的重要实验基础。因此,第一代华人物理学家的的工作,多集中在当时国际物理学最活跃的实验原子物理和光谱学方向。

胡刚复 1918 年在哈佛获博士学位,是我国最早从事 X 射线实验的学者之一^[2]。他与杜安(W. Duane)合作,用布拉格散射方法精确测定了原子序数为 25—34 元素 K 线的临界吸收波长,将电子速度与原子序数关系制图,完善了莫斯利定律。他还首次测量了

X射线光电子的速度分布和散射分布,确认了选择性光电效应和选择性散射的存在^[3]。胡刚复的研究明确了原子内部电子结构与X射线发射机制,为量子原子模型提供了实验依据。

1922年,饶毓泰获得博士学位。他早年在汞灯低压放电研究中,揭示了激发电压远低于电离电势的现象,为理解原子能级结构提供了重要实验线索。留学德国期间,他系统开展原子光谱外场效应研究,20世纪30年代初在铷、铯等原子上观察到电场对谱线的分裂和红移(逆斯塔克效应)。这些精密测量为量子力学微扰理论提供了关键实验数据,使理论能够准确预言原子在外电场中的行为。此后他还研究多原子体系的光谱,将量子理论推广到更复杂系统。

叶企孙于1923年获得博士学位,1921年,叶企孙和杜安、帕尔默(H. H. Palmer)合作,用X射线测定了普朗克常数^[4],得出当时最精确的普朗克常数值。除此之外,他还是中国第一个研究磁学的人。他开创性地研究了流体静压力对铁磁性金属的磁导率的影响。回国后,他创办了清华物理系,并担任系主任,先后聘请了一批知名学者任教,为中国物理教育作出了很大贡献。

同样从事X射线研究的吴有训,他在芝加哥大学师从康普顿(A. H. Compton),于1926年获得博士学位。他围绕量子理论中的关键问题——康普顿效应,进行了大量精密实验。在1924年至1926年间,他采用不同物质作为散射体,测得15种材料的X射线散射光谱^[5],即后来被称为“吴有训光谱”,从实验上有力证明了康普顿效应的普遍性。此外,吴有训还通过改进实验装置,先后否定了当时流行的“三次辐射”假设和“箱子效应”等错误解释,进一步澄清了X射线散射机制。在定量研究方面,他测定了散射过程中变线与不变线之间的能量分配关系,并分析其与散射角的函数关系,从而深化了对光子动量与能量转移规律的认识。这些研究不仅巩固了光子理论的实验基础,也推动了量子力学在散射问题中的应用发展。

1926年获博士学位的谢玉铭是中国最早研究氢原子精细结构的学者之一。1933年,他与豪斯顿(W. V. Houston)合作测量氢原子光谱精细结构,发现实际测得的谱线间距系统性偏小,并且超出了实验误差范围^[6]。基于这一结果,他们指出这种差异很可能源于“电子与辐射场相互作用”的忽略,即电子自能效应。这一领先一步的结论后来被称为“兰姆位移”。兰姆于1947年以微波共振法得出了

与谢玉铭实验一致的结论,并因此获得1955年诺贝尔物理学奖。谢玉铭的研究首次将量子电动力学中自能的概念带入氢谱学领域,对后来重整化理论的发展起到了启示作用。

我国第一位女性物理学博士是顾静徽(1933年在美国密歇根大学获得博士学位),同时,她也是中国最早的女性光谱学研究者。她在导师丹尼森(D. M. Dennison)的指导下,运用量子力学理论研究了三原子分子的振动光谱,完成了“二氧化氯的吸收光谱”“对称三原子分子带光谱系的强度分析”两篇独立署名论文。1971年诺贝尔化学奖得主赫茨伯格(G. Herzberg)在他的三卷本名著《分子光谱和分子结构》中引用了顾静徽的论文,并注明该文是当时唯一的一篇研究三原子分子二氧化氯的紫外吸收光谱的论文^[7]。

此外,1927年获博士学位的严济慈,从事压电晶体学、光谱学、大气物理学、应用光学、光学仪器研制等多个领域的研究^[8],精确测定了压电效应反现象并发现光双折射效应,发现石英扭电定律,在光学材料方面,他还发现了压力减弱乳胶感光性能的现象。

1.2 量子理论研究

中国最早从事量子理论研究的是王守竞。他于1928年在哥伦比亚大学获得物理学博士学位,是美国最早一批量子力学方向的博士学位。随后,他在威斯康星大学从事博士后研究,并于1929年回国。在量子力学建立初期,他连续完成了三项具有重要影响的研究工作。

王守竞的第一项重要研究,是关于两个氢原子之间相互作用的量子力学计算问题。两个氢原子之间的相互作用不仅包括库仑力,还涉及电子在两个原子核势场中的量子运动以及电子交换效应。王守竞尝试将新建立的量子力学直接应用于多粒子体系,通过构造合适的波函数,对双原子体系的相互作用能进行计算。这项工作于1927年发表,吴大猷评价他“量子力学一发展出来,他就坐上头一列火车”^[9]。

第二项工作围绕氢分子成键问题展开。氢分子是最简单的分子体系,在理解化学键形成机制方面具有基础意义。1927年,海特勒(W. Heitler)和伦敦(F. London)已经提出用量子力学解释共价键形成的理论框架,指出电子交换效应在分子稳定性中起决定性作用。但在具体计算中,这种方法受到数学处理上的限制。王守竞在这一工作的基础上,首次引入变分法,通过构造更为灵活的试探波函数,并

将有效电荷等参数纳入变分过程,对氢分子的结合能进行了系统计算。他给出了结合能随原子间距变化的关系,明确展示了分子在平衡距离处的稳定性。这项工作作为他的博士论文发表于1928年^[10],名为《新量子力学中的正常氢分子问题》,是美国大学体系中较早以量子力学为研究主题完成的博士论文之一,也是哥伦比亚大学物理系第一篇纯理论物理博士论文。这项研究使量子力学对化学键的解释从定性层面推进到定量层面。变分法后来在分子量子力学和量子化学的发展中也被不断采用,成为处理复杂量子体系的常用方法。

第三项工作涉及分子转动问题中的不对称陀螺模型。在经典力学中,对称陀螺问题较为容易处理,而不对称陀螺由于缺乏轴对称性,其运动分析较为复杂。在量子力学框架下,分子转动需要通过求解相应的薛定谔方程来描述,而现实中大量分子(如水分子)都属于不对称陀螺体系。王守竞最初尝试采用波动力学方法处理不对称陀螺问题,但在变量分离过程中遇到困难,随后转而采用矩阵力学的方法。他通过对角动量算符进行系统处理,推导出了可用于数值计算的不对称陀螺能级表达式。这一结果发表于1929年的《物理评论》^[11],并很快被欧洲学者引用。这项作为理解分子转动光谱提供了理论基础,也展示了矩阵力学在处理复杂角动量问题时的优势。

同年,周培源也取得博士学位。他主要研究广义相对论和湍流理论,提出了著名的雷诺应力公式,是中国流体力学与引力学研究的奠基人之一。在取得博士学位后,他又分别跟随海森堡和泡利(W. E. Pauli),从事量子力学研究。此外,他在量子力学教育上也发挥了重要作用,1929年他担任清华大学最年轻也是第一位理论物理学教授,带领昆明西南联大一批学生进入理论物理研究。

总体来看,20世纪30年代以前获得博士学位的这批物理学家,回国后大多投身于高校的教学与研究事业。他们不仅将当时前沿的量子力学知识引入课堂,更在清华大学、北京大学等知名学府承担起学科建设与人才培养的重任,是华人量子力学领域的第一代开拓者。

2 第二代 进入量子科学家成长储备期

20世纪30年代至新中国成立前,中国量子科学家在前一代的基础上成长起来。他们中的许多人在抗战前后留学归国,随着国际物理学研究重心由原

子物理逐步转向核物理和粒子物理,这一代科学家的研究方向也随之发生明显变化。他们开始直接面对量子理论发展中的关键问题,并在原子物理、统计物理、核物理、高能物理和量子场论等方向上展开更深入的探索。

2.1 理论方面

吴大猷是第二代华人量子科学家的代表。在中国,最早学理论物理的前两位是王守竞和周培源,第三位就是吴大猷^[9]。1931年,经饶毓泰、叶企孙推荐,他获中华教育文化基金会奖学金赴美留学。当时的密歇根大学是美国量子力学研究的中心,吴大猷一方面从事实验方向做红外光谱学,一方面主要开展原子物理理论研究。他的博士论文《两个最低点特征值问题与重原子f态量子亏损》预言了铀92附近将出现第二个稀土族元素,还探讨了前人未涉及的具有两个不对称最小值位势的量子力学问题。在二战期间核物理发展迅猛的背景下,铀后元素通过多种方式陆续被发现,西博格(G. T. Seaborg)因掌握铀后元素钚-94的化学性能,于1951年荣获诺贝尔化学奖,吴大猷的研究展现的前瞻性因此更加明显。

1937年抗日战争爆发后,北方高校西迁昆明,组成国立西南联合大学。在艰苦的环境中,物理系由吴大猷、叶企孙等人领衔继续教学。在这一时期,吴大猷的研究因实验条件受限而更偏重理论,涉及分子振动与转动、大气物理过程、电子激发分子振动等多个方向^[12]。美国引爆首颗原子弹后,南京国民政府决定安排华罗庚、吴大猷、曾昭抡各自挑选两位优秀青年出国进修相关知识,吴大猷挑选了朱光亚和李政道。抵达美国后,内战爆发,只能安排学生入学,吴大猷从此滞留海外。此后,他的研究逐渐转向了分子束实验、核物理和量子散射理论。1962年,他与日本物理学家大村充(T. Ohmura)合作出版了《散射的量子理论》,为量子散射理论的教学发展作出了重要贡献。

束星北也是我国早期从事相对论和量子力学研究的理论物理学家之一。他曾尝试将爱因斯坦广义相对论的引力定律推广到球对称的动力场,得到有质量辐射的近似解^[13]。此外,他曾在浙江大学等高校教授量子力学,尝试从测量和数学推导角度阐述测不准原理,对中国早期理论物理教育产生影响。

统计物理领域的代表性学者是王竹溪和张宗燧。20世纪30年代中期,统计物理学研究重点从准自由粒子系统转向有比较强的相互作用的合作系

统^[14]。1933年至1938年,王竹溪在英国剑桥大学攻读博士学位,师从福勒(R. H. Fowler)。福勒不但统计热力学领域的奠基者之一,也是量子理论的重要传播者。在剑桥求学期间,王竹溪主要研究了超晶格和相变问题,对贝特理论做出了明显改进。1938年学成回国后,他前往西南联合大学任教,把统计物理和量子理论引入国内课堂。

张宗燧则发展了合作现象和相变理论,提出“张组合公式”,证明贝特近似与准化学近似的等价性。1938年博士毕业后,他跟随玻尔研究量子场论。他较早研究约束系统的正则量子化^[15],认识到规范理论中任意时空函数和不定乘子会给量子化带来困难,并区分不同类型约束,提出相应量子化方法。此外,他还发展了协变规范模型的量子化方法,将规范条件从算符方程转化为对态的约束,这些工作为后来的约束系统量子化与规范场论的发展奠定了重要基础。

20世纪40年代,在非平衡统计物理学中做出贡献的,有两位女物理学家,王明贞和王承书^[16],她们都师从乌伦贝克(G. E. Uhlenbeck),从事统计物理与布朗运动的理论研究。王明贞系统研究了玻尔兹曼方程的不同解法,并首次独立地从福克-普朗克方程和克莱默方程推导出自由粒子和简谐振子的分布函数。并在此基础上建立了较为系统的布朗运动理论^[17]。二战期间,她去麻省理工学院雷达实验室研究噪声理论,后来又在高分子统计理论方面做出了一些开拓性的工作。

王承书则与乌伦贝克合作,提出了著名的王承书-乌伦贝克公式,解决了稀薄气体动力学中处理非平衡态分布函数的问题,并在多原子分子气体的输运系数理论研究中做出重要贡献。

在粒子理论与量子场论领域,彭桓武1938年赴英国爱丁堡大学留学,分别于1940年和1945年在爱丁堡大学获得哲学和科学博士学位。他在量子力学领域的重要工作大致分为两个时期。一是在留学期间,他在早年参与了介子理论与宇宙线问题的研究,与海特勒、汉密尔顿(J. Hamilton)合作提出了HHP理论,将量子场论方法应用于宇宙线现象的解释,发展了量子跃迁概率的理论,在这一理论中已包含后来被称为戴森方程的思想。后来,又与玻恩(M. Born)做了关于场的量子力学的一系列探索性工作。二是回国后,他延续了国外介子问题的研究,同时也把方向转为原子核物理和核能应用上。

此外,马仕俊、胡宁、朱洪元也取得了出色的研

究成果。马仕俊于1941年获得博士学位,彼时汤川秀树(H. Yukawa)刚刚提出介子理论,这一方向正是当时粒子物理最活跃的研究前沿。马仕俊围绕介子场论及其研究方法开展了大量系统研究,工作覆盖氘核的光磁蜕变、原子核静电偶极矩、介子散射与积分方程等多个问题,其中多项研究都是在西南联大极端艰苦的环境中完成的。在量子电动力学方向,他发现了海森堡S矩阵中著名的多余零点,并率先指出费米处理量子电动力学方法存在的一处缺陷^[18]。

胡宁1943年获得博士学位。他早年致力于流体力学中湍流理论的研究,20世纪40—50年代,转向介子核力理论、广义相对论、S矩阵理论、量子电动力学与粒子物理等领域。60年代中期,他和朱洪元、何祚庥、戴元本共同领导建立和发展了强子内部结构的层子模型理论工作,对高能物理实验中的大量新强子和新现象做了分析并对强子结构和强相互作用动力机理做了探讨。著有《广义相对论和引力场理论》《场的量子理论》《电动力学》《层子模型里重子的分类》,被称为“中国开辟量子场论和粒子物理理论研究的先驱之一”。

朱洪元于1948年获得博士学位,他在20世纪40年代全面探讨了高速荷电粒子在磁场中运动时发出的电磁辐射特性。到了20世纪60年代,他深入研究了利用色散关系和么正条件构建低能强作用理论的问题,并对包含光子、电子、中子和原子核的高温高密度系统内部的输运过程进行了深入探索。

2.2 实验方面

与理论研究相对应,20世纪30年代后,国际实验物理也由原子光谱和X射线研究逐步转向核物理、宇宙线、高能粒子和精密波谱学。第二代实验物理学家的的工作,正是在这一转向中展开的。

在原子、分子和固体结构实验中,余瑞璜于1937年获得曼彻斯特大学博士学位,主要从事X射线晶体结构分析与固体物理研究。他早期关于氩的X射线吸收与散射的实验研究,给出了精确的散射系数与吸收数据。在晶体结构分析领域,他利用摆动晶体X射线谱仪,对多种化合物的晶体结构进行精确测定,并在此基础上提出了新的X射线数据综合方法^[19]。这一方法推动了晶体学中电子密度分布研究的发展,为量子力学解释固体结构提供了更加可靠的实验基础。进一步地,余瑞璜在长期研究基础上提出“固体与分子经验电子理论”^[20],对固体中电子结构、键合性质及物理参数之间的关系作出统一解释。

在波谱学方向,20世纪20年代末到30年代初,任之恭从事了氢原子连续电子亲和谱的理论研究,给出了该问题的早期量子力学计算结果。这一工作与氢负离子及其在天体物理中的吸收问题密切相关,是量子力学在原子体系中的早期应用之一。从40年代末期开始,任之恭致力于微波波谱的研究。他利用电子自旋共振的方法,深入研究了分子中的核磁相互作用^[21-22],这些研究是量子力学在原子与分子体系中的具体展开,具有基础性的应用和理论价值。

抗战结束前后,随着国际范围内核物理和高能物理研究的迅速发展,中国学界内部逐渐兴起“核物理热”。赵忠尧的工作就集中在这个主流问题上。1930年,他获得博士学位。在加州理工学院师从密立根(R. A. Millikan)期间,研究 γ 射线与物质的相互作用,在重元素中发现了硬 γ 射线的异常吸收和伴随出现的“特殊辐射”^[23-24],最早观测到正负电子对产生和湮灭现象。这一成果从实验上接近了反物质(正电子)的发现,为后来人类正电子的发现和量子电动力学的接受铺平了道路。后来,安德森(C. D. Anderson)由于发现了正电子而获得诺贝尔奖,与赵忠尧的早期工作存在明显的连续关系。1983年,杨振宁和李炳安耗时数年,查找并调查相关文献,最终以确凿证据证明了赵忠尧在发现正电子领域的开创性贡献,指出他是发现反物质的第一人^[25]。

1930年回国后,赵忠尧将主要精力投入到中国核物理实验体系的创建之中。他先后在清华大学、西南联合大学及中国科学院主持建立了中国最早的核物理实验体系,建成第一台和第二台质子静电加速器,使量子力学首次在中国获得稳定的高能实验平台。因此,赵忠尧不仅是反物质实验的先驱,也成为中国核物理与粒子物理学术谱系的奠基者,被称为我国的“原子能之父”。

赵忠尧开辟的这条道路,很快在其学生中得到延续。1933年,王淦昌获得博士学位。他在量子理论问题上的贡献,首先体现在对中微子的研究上。20世纪30年代初, β 衰变连续能谱与原子核离散能级理论之间的矛盾,引发了著名的“能量危机”。泡利提出中微子假说,费米(E. Fermi)又建立了 β 衰变理论,但中微子长期停留在“理论假设”层面,始终难以直接探测^[26]。1941—1942年间,王淦昌提出了一种探测中微子的实验方案^[27]:通过研究轻原子核捕获内层电子时原子核的反冲来间接确认中微子。这一想法将三体 β 衰变问题化为二体过程,为国际

后来的中微子捕获实验提供了思路并奠定了证据基础。50年代初,国际上通过电子俘获反冲核实验获得决定性证据,最终确认了中微子的存在。

张文裕是中国宇宙线研究和高能实验物理的开创者。他于1938年获得博士学位,早年,他发现了 μ 原子^[28],随后又证明了 μ 介子并非强相互作用粒子,从而开拓了奇异原子物理研究领域。回国后又致力于宇宙线实验站与高能物理实验基地建设,对中国高能物理研究体系的形成作出了重要贡献。

何泽慧、吴健雄也是这一代实验物理学家的杰出代表。其中,何泽慧和王淦昌一样都是赵忠尧的学生。何泽慧于1940年获得博士学位,在德国和法国从事核反应与宇宙线实验研究。1945年,她通过磁云室研究揭示了正负电子高能弹性碰撞现象;1946年又在铀核裂变研究中发现三分裂和四分裂现象,修正了当时对裂变过程的简单认识。1948年回国后,她主持推进核乳胶自主研制,为中国高能物理和核物理实验研究提供了关键探测材料。

同年获得博士学位的吴健雄,她的博士论文是关于 β 衰变和放射性同位素的产生问题,她后来的工作都围绕这一研究方向。第二次世界大战期间,吴健雄参与了曼哈顿计划相关工作,她对核裂变产物中氙-135的中子吸收效应进行了关键分析,帮助解释了汉福德反应堆运行中的异常现象^[29]。战后,吴健雄继续投入到对 β 衰变的研究中。她通过改进实验,验证了费米 β 衰变理论的正确性^[30]。这一工作巩固了弱相互作用早期量子理论的实验基础,也确立了她在 β 衰变研究领域的权威地位。20世纪50年代中期,围绕弱相互作用是否满足宇称守恒的问题,理论物理学界出现了重大分歧。李政道和杨振宁在系统梳理已有实验后指出:弱相互作用中并不存在直接证明宇称守恒的实验依据,并提出了可以检验这一问题的实验方案。吴健雄凭借其在 β 衰变实验方面的长期积累,承担了这一关键实验验证工作。她选择钴-60作为研究对象,在极低温和强磁场条件下,使原子核自旋取向高度一致,从而精确测量电子发射方向的空间分布。实验结果清楚地显示,电子发射存在显著的方向不对称性,直接证明弱相互作用中宇称不守恒^[31]。吴健雄的实验,使一个大胆的理论判断获得了无可置疑的物理实证。此后,吴健雄继续通过实验检验弱相互作用中的其他基本假设。60年代,她验证了费曼(R. Feynman)和盖尔曼(M. Gell-Mann)提出的向量流守恒假说^[32],为弱相互作用理论的规范结构提供了关键支持。她还通过

双 β 衰变实验,进一步探讨了电荷共轭对称性在弱相互作用中的适用性。此外,她在量子纠缠光子实验、梅斯堡效应以及核过程精密测量方面的工作,也不断拓展了量子力学实验验证的边界。

第二代华人量子科学家的贡献已不同于早期引进和验证量子理论的阶段。他们中的部分人继续推进原子、分子和统计物理研究,部分人随国际物理学重心转移,将研究方向推进到原子核、基本粒子与量子场论问题。1937年抗战全面爆发,中国高等教育体系受严重冲击,高校大规模内迁,清华、北大、南开在长沙组建临时大学,后迁至昆明成立西南联大。在物质与实验条件匮乏受限的环境中,吴大猷、王竹溪、马仕俊等学者一方面跟踪国际物理发展,另一方面在国内开展量子力学、统计物理与近代数学的教学与研究。因此,这一时期是中国量子科学在艰难中维系发展的阶段,也是为第三代科学家的崛起奠定重要的学术基础的阶段。

3 第三代 迈入量子前沿

第三代华人量子科学家的成长与崛起,发生在二战结束、中华人民共和国成立以及冷战格局形成之后的特殊历史阶段。二战以后,量子电动力学、重整化理论和基本粒子物理迅速成为国际理论物理前沿。随着介子、奇异粒子以及弱相互作用问题不断出现,物理学界逐渐意识到,原有的守恒律、对称性和相互作用分类需要重新检验。第三代华人量子科学家正是在这一背景下,迅速融入并引领了国际理论物理和实验物理的最前沿。

3.1 量子场论和基本粒子研究

1957年,杨振宁和李政道因共同提出弱相互作用中宇称不守恒而获得诺贝尔物理学奖,这是华人科学家首次获得诺贝尔奖。

杨振宁和李政道都在中国本土完成了早期学术训练。杨振宁在西南联大先后师从吴大猷、王竹溪,系统学习了群论、统计物理和量子场论。李政道也在西南联大接受了系统训练,被吴大猷推荐赴美深造^[33]。所以,两人在进入国际学术界前,已具备扎实的数学与理论物理基础。

进入美国后,两人迅速融入当时世界最前沿的量子场论与粒子物理研究中。杨振宁最重要的贡献首先是1954年与米尔斯(Robert Mills)提出的非阿贝尔规范场理论^[34],也就是后来的“杨-米尔斯理论”。这一理论将规范不变性思想,从阿贝尔群推广到非交换群,引入多分量规范场,为描述强、弱、电磁

相互作用提供了统一的数学框架。后来随着电弱统一理论和量子色动力学的发展,杨-米尔斯理论逐渐成为现代标准模型的核心基础。

统计力学方面,在西南联大时期,受王竹溪的影响,杨振宁对昂萨格二维伊辛模型(square-lattice Ising model)产生了很大的兴趣。1949年杨振宁到普林斯顿高等研究所后,求得了伊辛模型的自发磁化强度的解析表达式^[35]。随后,又与李政道合作提出“杨-李定理”,通过分析配分函数零点在复平面上的分布,建立了相变发生的判据^[36-37]。20世纪60年代后,杨振宁进一步提出并发展了“杨-巴克斯特方程”。杨-巴克斯特方程后来广泛影响了量子场论、可积模型、共形场论、量子群、拓扑数学等多个领域。1990年,国际数学家大会颁发的数学最高奖——菲尔兹奖,四位获奖人中就有三人的研究与杨-巴克斯特方程有关。

杨振宁和李政道最著名的工作,就是弱相互作用下的宇称不守恒的发现。20世纪中叶以前,宇称守恒被普遍视为自然界的基本规律。但“ θ - τ 之谜”暴露出了理论上的严重矛盾。1956年,两人在系统梳理当时所有相关实验后,发现弱相互作用中实际上并不存在宇称守恒的直接实验依据,并首次明确提出宇称在弱相互作用中可能不守恒^[38],同时设计出可供检验的实验方案。1957年,吴健雄等人通过极化钴-60 β 衰变实验,证实了弱相互作用中宇称不守恒的存在。宇称不守恒的发现,被认为是20世纪物理学思想史上的重大转折,并推动了手征理论、电弱统一理论以及后来标准模型的发展。

在与杨振宁长期合作之外,李政道本人也在量子场论多个方向上提出了具有独立意义的重要工作。1954年,他提出了后来被称为“李模型”的可解场论模型,首次严格展示了场论中的重整化结构^[39]。1962年,木下东一郎(T. Kinoshita)系统研究了费曼振幅中的质量奇点,指出在对相关末态求和后,跃迁概率中的奇点可以相互抵消^[40]。1964年,李政道和诺伯格(M. Nauenberg)进一步从简并初态和末态求和的角度研究了质量奇点及红外发散的消除问题^[41]。后来,三人的相关成果被概括为KLN定理,成为高能物理计算的重要理论基础。

20世纪60年代末至70年代初,李政道又继续围绕CP破坏、自发对称性破缺以及真空结构问题展开研究。他和威克(G. C. Wick)提出在希尔伯特空间中引入不定度规的方法,用以处理量子场论中的紫外发散问题,并进一步讨论其物理一致性^[42]。

随后,他又提出新的CP破坏机制,这些思想至今仍是B介子与 τ -粲物理等高能实验的重要理论动机之一。

1974年,李政道与威克进一步提出,在极端条件下,自发破缺的真空对称性可能在有限区域内被部分“恢复”,并指出相对论重离子碰撞可以作为检验这一现象的实验手段^[43]。这一思想直接催生了相对论重离子碰撞的发展,使高能核物理成为连接量子场论、核物理与宇宙早期物理的重要桥梁。与此同时,李政道还在场论中系统研究了一类新的经典解及其量子化形式。他与弗里德伯格(Richard Friedberg)、希林(Abraham Sirlin)等人提出并发展了非拓扑孤子理论,并进一步将其引入强子结构模型^[44]。此后,他还系统研究了非拓扑孤子理论以及离散时空问题^[45],试图从更深层面探索量子场论与统一理论的可能结构。

这一时期,从事量子场论和基本粒子理论的还有杨立铭,他于1946年前往爱丁堡大学师从玻恩,1948年获得博士学位后继续担任玻恩的研究助理^[46]。1947年,他通过追踪流体中个别原子的运动,导出了混合液体的扩散系数。1949年,他进一步研究了原子核结构问题,导出了在合理核密度分布下原子核中存在的幻数。1950年,在学习量子场论的新发展过程中,他又求得了狄拉克矩阵乘积阵迹的简单方法。回国后,他进一步提出处理变形核中核子对相互作用的新方法,并发展了系统的IBM微观理论。

20世纪50年代末至60年代初,周光召在苏联杜布纳联合核子研究所工作期间,首次系统提出并建立了相对论性螺旋度散射振幅的理论框架^[47],澄清了相对论量子场论中“粒子自旋态”的根本定义问题。这一工作明确区分并统一了有质量与无质量粒子的螺旋态描述,使高能散射过程的理论表达摆脱了传统角动量展开的限制。

1960年前后,周光召独立、严格地推导出赝矢量流部分守恒定理(PCAC)^[48],揭示了强相互作用与弱相互作用在手征对称性层面的深层联系。PCAC成为20世纪60年代粒子物理理论发展的奠基性成果之一。在完成国家重大任务后,周光召于20世纪70年代末重新回到基础理论研究前沿,系统发展了非平衡态量子场论的闭路格林函数形式,使量子场论能够描述真实时间演化过程,而不仅限于散射问题。这一理论框架如今已成为重离子碰撞、早期宇宙演化以及凝聚态量子多体系统研究中的标准

方法。

1958—1960年间,何祚庥对普适费米型弱相互作用进行了研究,发现 μ 子俘获与辐射俘获现象中存在新的选择法则,并分析了V-A型弱相互作用在弗尔兹变换下的性质及其与辐射修正问题的关系。同一时期,何祚庥与冼鼎昌、朱洪元等人在研究双重色散理论时发现,邱-门德尔斯坦方程(Chew-Mandelstam equation)存在不可消除的发散积分,从而否定了该方程的理论成立基础。60年代,何祚庥从事了有关层子模型的研究之后,又建立了一个复合粒子量子场论的新体系,进一步推广了层子模型。之后,他又进行了中微子质量、暗物质、高奇异数超核问题的研究。

戴元本也是北京基本粒子研究组开展的“层子模型”合作研究的重要参与者之一。1964年前后,戴元本在当时高能物理理论的热点问题“雷杰极点(Regge pole)”的研究中指出,在高奇异位势条件下,由于雷杰极点分布方式的不同,散射振幅会呈现出与传统理论预期不同的高能渐近行为。

20世纪60和70年代之交,郝柏林求得了三维伊辛模型的一个封闭近似解。在70年代,他又和于渌合作,用骨架图展开方法把连续相变临界指数计算推进到高阶,这是中国大陆物理学界早期参与重整化群理论研究的重要成果之一。

在高能物理实验方面,1976年,丁肇中因发现 J/ψ 粒子而与伯顿·里克特(B. Richter)共同获得诺贝尔物理学奖,成为继杨振宁、李政道之后第三位获此殊荣的华裔物理学家。

丁肇中于1962年获得博士学位。20世纪60年代,他在联邦德国汉堡电子同步加速器上进行了关于量子电动力学和矢量介子的实验,对矢量介子的产生、衰变及干涉现象进行了精密测量,推动了强相互作用实验研究的发展。1974年11月,他在布鲁克黑文国家实验室领导实验发现质量约3.1 GeV的新共振粒子,并将其命名为“J粒子”^[49]。与此同时,斯坦福直线加速器中心的里克特小组也发现了同一粒子,称其为“ ψ 粒子”,两者随后被确认是同一种粒子,故合称 J/ψ 介子。 J/ψ 粒子的异常长寿命表明其内部存在新的夸克结构,从而首次确认第四种夸克——粲夸克的存在。这一发现被称为粒子物理学的“十一月革命”,也成为量子色动力学建立的重要实验依据。

在发现 J/ψ 之后,丁肇中继续通过一系列实验检验和拓展标准模型的量子理论。20世纪70年代

末,他在德国 DESY 研究中心主持 MARK-J 实验,首次清晰观测到三喷注事件,从实验上确认了胶子的存在^[50]。随后,他又在欧洲核子研究中心主持 L3 实验,对 Z 玻色子性质及轻子、夸克结构进行了精密测量,进一步验证了标准模型。90 年代后,他又推动阿尔法磁谱仪(AMS)实验,通过宇宙线观测寻找反物质和暗物质存在的证据,使研究进一步拓展到粒子天体物理领域。

中国台湾地区第一位获得诺贝尔奖的科学家是李远哲,他的工作主要集中在化学物理方面。李远哲早期的博士研究聚焦于激发态碱金属原子的化学离子化过程。他发现,当电子从碱金属二聚体分子中移除后,体系会出现“键距更长而键结更强”的反常现象。这一结果揭示了分子激发态结构中更为复杂的量子效应。

博士后阶段,李远哲进一步研发出世界上第一套通用型交叉分子束装置。这个装置能够以前所未有的精度研究微观分子运动过程^[51]。借助这一技术,他成功解析了惰性气体原子的量子干涉散射结构,使分子间相互作用势能的测定精度大幅提高,成为后来分子动力学研究的重要实验标准。之后,他还进行了包括碱金属卤化物的碰撞诱发分解研究、不稳定稀有气体原子的散射研究,以及首次运用交叉分子束开展氟原子与氢分子及不饱和碳氢化合物间反应的研究等。凭借交叉分子束技术及其在分子反应动力学中的开创性贡献,李远哲于 1986 年获得诺贝尔化学奖。

3.2 凝聚态物理

量子力学的诞生使凝聚态物理学具有了坚实的理论基础,其中,固体物理是在量子理论基本框架确立后,逐步吸纳其方法并发展为独立学科的区域^[52],20 世纪 50 年代以后,固体物理成为物理学的主流。

黄昆是华人科学家中,最早在这一方向做出原创工作的代表性人物,他的贡献主要体现在三个方面。

其一,是提出固体中杂质缺陷导致 X 射线漫散射的理论。1947 年,黄昆在研究稀溶体晶体时,首次系统分析了溶质原子引起的晶格畸变问题,并建立了漫散射强度与缺陷分布之间的定量关系^[53]。这一理论后来被称为“黄散射”,成为研究晶体缺陷和局域结构的重要工具。

其二,建立多声子辐射与无辐射跃迁的量子理论。1950 年前后,黄昆与其夫人——英国物理学者

艾夫·里斯(A. Rhys)发展了多声子跃迁理论,引入“黄-里斯因子”^[54]。该理论成功解释离子晶体中色心宽谱发光等现象,拓展了量子跃迁理论,至今仍是凝聚态光谱和材料物理的标准模型。

其三,提出晶体中声子与电磁波耦合振荡理论,即“黄昆方程”。该方程预言,特定条件下光学声子与光场强耦合会形成新集体激发模式^[55]。这个方程首次将声子与光子统一于量子描述框架,引入新准粒子概念,拓展了学界对固体中量子激发形式的认知,成为研究强光与物质相互作用、微腔量子电动力学及新型量子器件的重要理论基础。

此外,1954 年,黄昆与其导师玻恩合著《晶体晶格动力学理论》,系统阐述了固体中振动模式的量子理论。这本书奠定了晶格动力学基本框架,被誉为该领域的经典之作。改革开放后,随着低维凝聚态体系和人工异质结构兴起,黄昆将理论方法推广到超晶格和量子阱等新体系,他与朱邦芬提出“黄-朱模型”,为纳米材料和量子器件研究提供重要理论基础。

与此同时,谢希德也在凝聚态物理特别是半导体与表面物理领域作出了重要贡献。20 世纪 40 年代后期,谢希德在麻省理工学院师从著名物理学家斯莱特(J. C. Slater),深入掌握了固体能带计算方法。20 世纪中期,她与黄昆一起开创了中国半导体物理和固体物理教学科研体系,是中国半导体物理学科与表面物理学科的主要奠基人之一。1958 年,黄昆和谢希德合作编写了我国最早的半导体领域的专著《半导体物理》。1963 年至 1965 年,谢希德从事固体能谱研究,先后对硒化锌、铋化钢等进行研究,获得初步成果,并在复旦建立了顺磁共振等当时比较先进的实验技术实验室。

1977 年底,谢希德在广泛调研国际科学发展趋势的基础上,认识到表面科学正在成为连接固体物理、材料科学和量子化学等领域的新兴交叉学科,并在全国自然科学学科规划会上提出在我国发展表面物理的倡议^[56]。1978 年全国科学大会后,谢希德又组织了表面物理和固体能带理论两个系列的学术报告讨论会。此外,她还在复旦大学着手筹建以表面物理为重点的现代物理研究所,建立多个研究室,推动复旦大学逐渐成为我国表面物理研究的重要基地^[57]。谢希德在多个相关理论研究中取得诸多突出成果,她指导的多项研究在 20 世纪 90 年代取得重要进展,这些工作对研究低维量子系统的相关效应和输运具有先驱意义。

4 结语

伴随量子科学的发展脉络,前三代华人量子科学家分别承担了不同阶段的历史使命,并逐步形成了较为清晰的学术谱系。第一代华人量子科学家中,叶企孙创办并长期主持清华物理系,先后延聘吴有训、周培源、赵忠尧等学者任教^[58],使清华大学在20世纪30年代成为中国最重要的现代物理训练基地之一。

第二代科学家中的许多人正是在这一学术环境中成长起来的。例如,王淦昌早在清华大学学习并留校任助教期间,曾在吴有训指导下开展清华园周围氦气强度变化的相关研究;彭桓武在清华求学期间,也受到吴有训、周培源、叶企孙等人的课程训练、学术风气和严谨治学精神的影响,其中周培源是其研究生阶段的重要指导教师。

在第一代影响下成长起来的第二代学者,又进一步培养和影响了第三代科学家。吴大猷早年就读于南开大学,因受到饶毓泰的赏识与深刻影响,从数学转入物理学领域。在饶毓泰等人的引领下,吴大猷最终深耕理论物理和原子分子物理领域,后来更被誉为“中国物理学之父”。抗战时期,吴大猷在西南联大开设电磁学、经典力学、近代物理和量子力学等课程,指导影响了杨振宁、李政道、黄昆等后起学者。

因此,华人量子科学发展的意义,不仅在于取得了诸多重要成果,更在于建立了连续不断的知识传承。第一代完成了量子概念、实验方法和现代物理教育制度的引入;第二代在战乱和迁徙中维系并扩展了这一传统;第三代则在前两代奠定的课程体系、研究风格和问题意识基础上,真正进入国际物理学前沿。正是这种由制度建设、师承授业和研究问题递进共同构成的传承网络,让华人科学家在量子物理百年发展中形成了持续清晰的历史脉络。紧接着这种代际之间的知识传递与精神传承,构成了华人量子科学发展的核心内在动力。

当然,前三代科学家的贡献主要集中于量子力学基础理论及相关实验领域,20世纪末之后,量子信息逐渐成长为量子力学与信息科学交叉形成的新前沿,华人科学家也在量子通信、量子计算、量子精密测量等方向展现出越来越强的引领作用。

参考文献:

[1] 戴念祖. 20世纪上半叶中国物理学论文集粹[M]. 长

沙:湖南教育出版社,1993.

- [2] 钱临照. 怀念胡刚复先生[J]. 物理, 1987(9): 513-515.
- [3] DUANE W, HU K F. On the Critical Absorption and Characteristic Emission X-ray Frequencies[J]. *Physical Review*, 1919, 14(4): 369. DOI: 10.1103/PhysRev.14.369.
- [4] DUANE W, PALMER H H, YEH C S. A Remeasurement of the Radiation Constant, h , by Means of X-Rays [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1921, 5(4): 376-387. DOI: 10.1073/pnas.7.8.237.
- [5] 邓淑琴. 康普顿效应的发现和启迪: 纪念康普顿效应发现70周年[J]. 物理, 1993(12): 752-756.
- [6] HOUSTON W V, HSIEH Y M. The Fine Structure of the Balmer Lines[J]. *Physical Review*, 1934, 45(4): 263. DOI: 10.1103/PhysRev.45.263.
- [7] 戴念祖, 刘娜. 顾静微: 中国第一个物理学女博士[J]. 物理, 2009, 38(3): 169-173. DOI: 10.3321/j.issn: 0379-4148.2009.03.004.
- [8] 戴念祖. 我国早期的近代物理学家[J]. 物理, 1983(10): 626-637.
- [9] 吴大猷. 早期中国物理发展的回忆(续二)[J]. 物理, 2005, 34(6): 399-404. DOI: 10.3321/j.issn: 0379-4148.2005.06.006.
- [10] WANG S C. The Problem of the Normal Hydrogen Molecule in the New Quantum Mechanics [J]. *Physical Review*, 1928, 31(4): 579. DOI: 10.1103/PhysRev.31.579.
- [11] WANG S C. On the Asymmetrical Top in Quantum Mechanics [J]. *Physical Review*, 1929, 34(2): 243. DOI: 10.1103/PhysRev.34.243.
- [12] 吴大猷. 早期中国物理发展的回忆[M]. 台北: 联经出版事业公司, 2001.
- [13] 束星北. 关于波动方程式之“超前解”[J]. 中国物理学报, 1950(2): 489-490.
- [14] 尹晓冬, 朱重远. 张宗燧与科学大师们[J]. 物理, 2015, 44(7): 460-468.
- [15] YIN X, ZHU Z, SALISBURY D C. Tsung-Sui Chang's Contribution to the Quantization of Constrained Hamiltonian Systems [C]//Traditions and Transformations in the History of Quantum Physics, 2010: 249. DOI: 10.34663/9783945561225-12.
- [16] 刘寄星. 历史的回顾与漫谈: 中国学者与统计物理学[J]. 物理, 2023, 52(9): 591-604. DOI: 10.7693/wl20230901.
- [17] WANG M C, Uhlenbeck G E. On the Theory of the Brownian Motion II [J]. *Reviews of modern physics*, 1945, 17(2-3): 323. DOI: 10.1103/RevModPhys.17.323.
- [18] MA S T. Redundant Zeros in the Discrete Energy

- Spectra in Heisenberg's Theory of Characteristic Matrix[J]. *Physical Review*, 1946, 69(11-12): 668. DOI: 10.1103/PhysRev.69.668.
- [19] 何思维,尹晓冬.纪念X射线衍射发现100年暨缅怀晶体学家余瑞璜先生[J].现代物理知识,2014,26(5): 5-7. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2014.05.001.
- [20] 余瑞璜.固体与分子经验电子理论[J].科学通报,1978(4): 217-224.
- [21] JEN C K. The Zeeman Effect in Microwave Molecular Spectra[J]. *Physical Review*, 1948, 74(10): 1396. DOI: 10.1103/PhysRev.74.1396.
- [22] JEN C K. Rotational Magnetic Moments in Polyatomic Molecules[J]. *Physical Review*, 1951, 81(2): 197. DOI: 10.1103/PhysRev.81.197.
- [23] CHAO C Y. The Absorption Coefficient of Hard γ -Rays[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1930, 16(6): 431-433. DOI: 10.1073/pnas.16.6.431.
- [24] CHAO C Y. Scattering of Hard γ -Rays[J]. *Physical Review*, 1930, 36(10): 1519. DOI: 10.1103/PhysRev.36.1519.
- [25] 李炳安,杨振宁,继尧.赵忠尧,电子对产生和湮灭[J].现代物理知识,1998(6): 29-33. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.1998.06.017.
- [26] 李炳安,杨振宁.王淦昌先生与中微子的发现[J].物理,1986(12): 758-761, 738.
- [27] WANG K C. A Suggestion on the Detection of the Neutrino[J]. *Physical Review*, 1942, 61(1-2): 97. DOI: 10.1103/PhysRev.61.97.
- [28] CHANG W Y. A Cloud-Chamber Study of Meson Absorption by Thin Pb, Fe, and Al Foils[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1949, 21(1): 166. DOI: 10.1103/RevModPhys.21.166.
- [29] WU C S, SEGRÈ E. Radioactive Xenons[J]. *Physical Review*, 1945, 67(5-6): 142. DOI: 10.1103/PhysRev.67.142.
- [30] WU C S. Recent Investigation of the Shapes of β -Ray Spectra[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1950, 22(4): 386. DOI: 10.1103/RevModPhys.22.386.
- [31] WU C S, AMBLER E, HAYWARD R W, et al. Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay[J]. *Physical review*, 1957, 105(4): 1413. DOI: 10.1103/PhysRev.105.1413.
- [32] WU C S. The Universal Fermi Interaction and the Conserved Vector Current in Beta Decay[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1964, 36(2): 618. DOI: 10.1103/RevModPhys.36.618.
- [33] 杨建邺.杨振宁传[M].北京:生活·读书·新知三联书店,2016.
- [34] YANG C N, MILLS R L. Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance[J]. *Physical Review*, 1954, 96(1): 191. DOI: 10.1103/PhysRev.96.191.
- [35] 杨振宁.三十五年心路[M].甘幼坪,译.南宁:广西科学技术出版社,1999: 23-24.
- [36] LEE T D, YANG C N. Statistical Theory of Equations of State and Phase Transitions. I. Theory of Condensation[J]. *Physical Review*, 1952, 87(3): 404-409. DOI: 10.1103/PhysRev.87.404.
- [37] LEE T D, YANG C N. Statistical Theory of Equations of State and Phase Transitions. II. Lattice Gas and Ising Model[J]. *Physical Review*, 1952, 87(3): 410-419. DOI: 10.1103/PhysRev.87.410.
- [38] LEE T D, YANG C N. Question of Parity Conservation in Weak Interactions[J]. *Physical Review*, 1956, 104(1): 254. DOI: 10.1103/PhysRev.104.254.
- [39] LEE T D. Some Special Examples in Renormalizable Field Theory[J]. *Physical Review*, 1954, 95(5): 1329. DOI: 10.1103/PhysRev.95.1329.
- [40] KINOSHITA T. Mass Singularities of Feynman Amplitudes[J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1962, 3(4): 650-677. DOI: 10.1103/PhysRev.81.197.
- [41] LEE T D, NAUENBERG M. Degenerate Systems and Mass Singularities[J]. *Physical Review*, 1964, 133(6B): B1549. DOI: 10.1103/PhysRev.133.B1549.
- [42] LEE T D, WICK G C. Negative metric and the unitarity of the S-matrix[J]. *Nuclear Physics B*, 1969, 9(2): 209-243. DOI: 10.1016/0550-3213(69)90098-4.
- [43] LEE T D, WICK G C. Vacuum stability and vacuum excitation in a spin-0 field theory[J]. *Physical Review D*, 1974, 9(8): 2291. DOI: 10.1103/PhysRevD.9.2291.
- [44] FRIEDBERG R, LEE T D, SIRLIN A. Class of scalar-field soliton solutions in three space dimensions[J]. *Physical Review D*, 1976, 13(10): 2739. DOI: 10.1103/PhysRevD.13.2739.
- [45] LEE T D. TD Lee Selected Papers[M]. Boston: Birkhäuser, 1986.
- [46] 厚宇德.玻恩如何帮助学生:以对杨立铭的关照为例[J].物理,2019,48(6): 393-396. DOI: 10.7693/wl20190606.
- [47] CHOU K C, SHIROKOV M I. The Relativistic Theory of Reactions Involving Polarized Particles[J]. *Soviet Physics JETP-Ussr*, 1958, 7(5): 851-857.
- [48] CHOU K C. On the Pseudovector Current and Lepton Decays of Baryons and Mesons[J]. *Soviet Physics JETP*, 1961, 12(3): 492-497.

- [49] AUBERT J J, BECKER U, BIGGS P J, et al. Experimental Observation of a Heavy Particle J[J]. *Physical Review Letters*, 1974, 33(23): 1404. DOI: 10.1103/PhysRevLett.33.1404.
- [50] BARBER D P, BECKER U, BENDA H, et al. Discovery of Three-Jet Events and a Test of Quantum Chromodynamics at PETRA[J]. *Physical Review Letters*, 1979, 43(12): 830. DOI: 10.1103/PhysRevLett.43.830.
- [51] LEE Y T. Molecular beam studies of elementary chemical processes[J]. *Science*, 1987, 236(4803): 793-798. DOI: 10.1002/anie.198709393.
- [52] 石锋, 韩秀君, 张灵翠, 等. 固体物理学发展简史[J]. *物理学进展*, 2021, 41(4): 170-187. DOI: 10.13725/j.cnki.pip.2021.04.002.
- [53] HUANG K. X-ray Reflexions from Dilute Solid Solutions[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1947, 190(1020): 102-117. DOI: 10.1098/rspa.1947.0064.
- [54] HUANG K, RHYS A. Theory of light absorption and non-radiative transitions in F-centres[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1950, 204(1078): 406-423. DOI: 10.1098/rspa.1950.0184.
- [55] HUANG K. Lattice Vibrations and Optical Waves in Ionic Crystals[J]. *Nature*, 1951, 167(4254): 779-780. DOI: 10.1038/167779b0.
- [56] 秦志伟. 谢希德: 一生心怀祖国的“斗士”[N]. *中国科学报*, 2021-03-22(001). DOI: 10.28514/n.cnki.nkxsb.2021.000939.
- [57] 中国科学技术协会. 中国科学技术专家传略 理学编 物理学卷 2[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 433-445.
- [58] 任之恭. 怀念叶企孙老师[J]. *物理*, 1992(8): 450-451.



彭鹏, 理学博士, 山西大学科学技术史研究所副教授, 硕士生导师, 中国科学技术史学会物理学史专业委员会副秘书长, 中国科学学与科技政策研究会技术预见专业委员会委员。主要研究方向为物理学史, 科技哲学, 科技政策等; 近年来, 主持国家自然科学基金、老科学家学术成长采集工程等项目 6 项, 参与 2 项国家社科基金重大项目, 1 项教育部重大课题; 先后在 *Nature Physics*, *Phys. Rev. Lett.*, 《哲学分析》等期刊发表论文 29 篇, 其中 3 篇被《新华文摘》全文转载, 2 篇入选封面要目, 2 篇被中国物理学会期刊网全文转载推送, 2 篇获“山西省社会科学研究优秀成果二等奖”。Email: pengpeng@sxu.edu.cn

(责任编辑: 陈 立)