

周光召对理论物理和原子能事业的贡献*

吴岳良^{1,2,†} 刘金岩³

(1 中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中国科学院自然科学史研究所 北京 100190)

2019-04-10收到

† email: ylwu@itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20190504

2019年5月15日,周光召先生迎来90华诞。他是国际知名理论物理学家,在中国核武器理论设计和人才培养方面发挥了重要作用,同时也是中华人民共和国改革开放以后科技事业发展的领导者。本文旨在评述周光召在理论物理方面的贡献,重点介绍其在杜布纳联合原子核研究所工作期间的基本粒子理论研究,及其重返理论物理学界后在凝聚态和统计物理、量子场论和粒子物理等方面的工作。

周光召1951年毕业于清华大学物理系,随后转入北京大学物理系,在彭桓武指导下研究基本粒子物理与量子场论。周光召研究生毕业论文与原子核能级问题相关,涉及双力程核子力问题^[1]。他首先利用双力程位能计算²H, ³H, ³He, ⁴He原子核的结合能,以及中子对低能质子的散射。计算结果显示结合能值有随核子数 A 上升过快的

趋势。为解决该问题,周光召继续研究介子场的三体力位能,通过计算赝标介子赝向矢量耦合中的三体力讨论,其能否解释³H, ³He, ⁴He原子核的结合能问题^[2]。研究生毕业后,周光召留北京大学任教,先后担任讲师和副教授。

1 杜布纳联合原子核研究所(1957—1961)

1957年初,北京大学教授胡宁推荐周光召赴苏联杜布纳联合原子核研究所¹⁾从事高能物理、粒子物理等方面基础研究(图1)。联合所主要基于苏联科学院原子核问题研究所同步回旋加速器(可将质子加速到0.68 GeV)和苏联科学院电物理研究室的同步稳相加速器(可将质子加速到10 GeV)建立而成,下设高能粒子研究室、原子核问题研究室、理论物理研究室和中子物理研究室²⁾。其成

立的目的旨在保证联合研究所所属成员国科学家开展并交流核物理理论和实验研究成果,促进核物理学发展。同时与苏联以外的核物理研究机构保持联系并寻找新的核能利用可能性^[3]。

中国政府自1956年至1965年先后共派遣约140位科学家在联合所工作,共缴纳

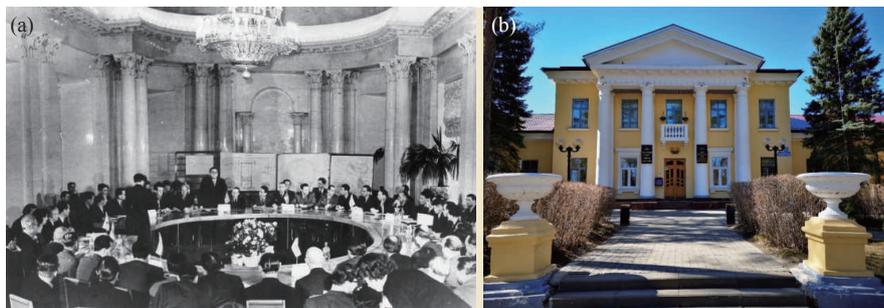


图1 (a)联合原子核研究所成员国政府全权代表会议(1956.3.26), 图片引自 *Joint Institute for Nuclear Research-Yesterday, Today, Tomorrow*; (b)联合原子核研究所主楼

* 国家自然科学基金(批准号: 11775207)、老科学家采集工程(批准号: CJGC2017-K-2-XH03)资助项目

1) 1956年3月,经苏联政府倡议,在莫斯科举行由苏联、中国、阿尔巴尼亚、保加利亚、匈牙利、德意志民主共和国、朝鲜、蒙古、波兰、罗马尼亚和捷克斯洛伐克代表参加的,关于成立联合原子核研究所问题国际会议。3月26日,上述11国签署《关于成立联合原子核研究所的决定》。同年9月,联合原子核研究所正式成立。同时,越南人民共和国加入联合所。

2) 4个研究室的主任分别为:维克斯勒通讯院士(Vladimir Iosifovich Veksler, 1907—1966)、契列波夫教授(Venedikt Dzhelepov, 1913—1999)、包果留波夫院士(Nikolay Nikolayevich Bogolyubov, 1909—1992)和弗兰克通讯院士(Ilya Mikhailovich Frank, 1908—1990)。中国科学院档案:档案号1957-02-012-05:关于参加联合原子核研究所的报告。

会费约3308万卢布，折合人民币约1.116亿元。中国派遣的理论物理学家包括胡宁、朱洪元、周光召、何祚庥、冼鼎昌等；实验物理学家包括王淦昌、丁大钊、吕敏等。联合所强调理论研究结合实验。理论物理学研究室的苏方成员都与一个实验组密切联系。中方科学家效仿苏方成员，主动与王淦昌带领的实验组联系。几乎每天晚上召开学术讨论会，报告最新学习、研究进展。真正体会理论如何联系实际。

周光召在联合所理论物理研究室工作时间为1957年1月24日至1961年2月20日(图2)³⁾。此时的粒子物理学发展正经历一场深刻变革的前沿发展。物理学家正陷于如何处理实验上发现众多新粒子的困境。他们通常提出新概念或新模型对新粒子进行分类并寻求粒子之间的关系。周光召充分利用杜布纳有利的学术环境，理论研究紧密结合实验，学术成果颇丰，共发表33篇学术论文⁴⁾。具体工作总结如下：

(1) 关注粒子的极化和自旋问题——建立极化粒子反应的相对论性理论，引入相对论性螺旋散射振幅概念和相应的数学描述。^[4-6]

周光召到杜布纳工作之初便开始关注超碎片 H_n^+ 和K介子的自旋和宇称。为适应分析高能散射振幅和Regge理论需要，他与合作者M. I. Shirokov⁵⁾于1958年引入相对论性自旋算符，给出有质量粒子任意自旋态的相对论性描述。1959年，周光召基于群理论方法独立将上述理论推广到无质量粒子(如光子、中微子)情形。几乎同时，M. Jacob和G.C. Wick也关注类似问题，提出螺旋度(helicity)概念，建立系统的螺旋性理论^[7]。随后，这套理论广泛应用于基本粒子的理论研究和高能物理实验的物理分析。

(2) 利用超子衰变过程研究粒子—反粒子不对称性——完善一个涉及时间反演和电荷共轭破坏的重要定理，即CPT保持不变，当T反演不守恒，粒子、反粒子衰变到不同态的分支比不同，



图2 周光召先生(二排右2)在杜布纳联合原子核研究所工作期间参加学术讨论会，前排左起：联合所所长布洛欣采夫院士(Dmitry Blokhintsev)，高能粒子研究室主任维克斯勒通讯院士(Vladimir I. Veksler)、周光召在联合所的导师马尔可夫院士(Moisey Markov)

尽管它们总的衰变宽度保持不变。^[8, 9]

1956年，杨振宁和李政道提出弱相互作用宇称不守恒理论。随后，物理学家开始怀疑C、CP和T是否守恒。1958年，S. Okubo利用弱相互作用低阶近似理论得出可利用实验测量 Σ^+ 和 $\bar{\Sigma}^+$ 衰变分支比，分支比不同则表明电荷共轭不变性或时间反演不变性破坏^[10]。周光召随后证明Okubo的方法具有普适性。他还指出测量 Σ 粒子及其反粒子(最简单的情况是测量 Σ^- 和 $\bar{\Sigma}^-$ 衰变)的角关联也可以得到电荷共轭和时间反演变换不变性的信息。1964年，J. Cronin和V. Fitch发现K介子弱衰变中的CP破坏，获得1980年诺贝尔物理学奖。

(3) 赝矢量流部分守恒的早期研究者之一——利用更简洁和清晰的方法证明赝矢量流部分守恒定律，被认为是强子领域的重要工作之一。^[11]

弱作用宇称不守恒理论的提出促使粒子物理学家深入研究弱作用本质。1958年，费曼(R. Feynman)和盖尔曼(M. Gell-Mann)^[12]与苏达珊(E. C. G. Sudarshan)和马尔萨克(R. E. Marshak)^[13]两组理论物理学家几乎同时给出弱作用普适形式，即费米作用具有V-A形式(V和A分别表示矢量和轴

3) 杜布纳联合原子核研究所档案。

4) 这些学术论文几乎由他一个人独立或者以他为主完成。其中29篇发表在苏联《实验与理论物理》(Journal of Experimental and Theoretical Physics)，4篇发表在欧洲《核物理》(Nuclear Physics)。

5) M.I. Shirokov(Михаил Иванович Широков，1929—2010)1952年毕业于莫斯科国立大学核物理专业。随后相继在苏联科学院电子物理实验室马尔可夫(M.A.Маркова)院士小组和杜布纳联合原子核研究所工作。

矢量)且由中间矢量玻色子传递,为弱电统一理论发展开辟道路。另外,他们的工作中还包含矢量流守恒(Vector Current Conservation, CVC)思想。1960年,盖尔曼、费曼与利威(M. Levy)合作研究当时与实验符合较好的戈德伯格—特里曼(Goldberger—Treiman)关系。所谓戈德伯格—特里曼关系,指的是 π 介子衰变常数、 β 衰变轴矢量耦合常数及强相互作用耦合常数间的关系式,即: $gf_{\pi}=mg_A$,其中 f_{π} 为 π -介子衰变常数, g_A 为 β 衰变轴矢量耦合常数, g 为强相互作用耦合常数。为解释戈德伯格—特里曼关系的成功,盖尔曼等人提出轴矢流部分守恒(Partial Conservation of Axial Current, PCAC)思想,即轴矢量流散度不为零,正比于 π 场。几乎同时,周光召也意识到解释戈德伯格—特里曼关系的重要性。他于1960年独立发表题为《关于轴矢量流和重子与介子的轻子衰变》论文。论文利用特定矩阵元的解析性质表明关于 $\pi\rightarrow\mu+\nu$ 衰变的戈德伯格—特里曼关系,同样适用于更广一类的强相互作用。而在这之前,费曼、盖尔曼和利威证明此关系仅适用于具有赝标量耦合的普通赝标量理论。周光召在该工作中利用同一方法处理超子和K介子的轻子衰变。因此,周光召被世界公认为PCAC理论的奠基人之一。由戈德伯格—特里曼关系得出的PCAC假设与CVC相对应。PCAC、CVC以及盖尔曼在夸克模型基础上提出的流代数,使粒子物理学家重新关注在色散关系鼎盛时期黯然失色的量子场论方法,对构建弱相互作用和电磁相互作用的规范理论具有重要启发意义,促使格拉肖(S.Glashow)、萨拉姆(A. Salam)、温伯格(S.Weinberg)提出电弱统一理论。

除上述3项重要工作外,周光召在杜布纳期间的工作还涉及到利用超子—核子碰撞研究 π - Λ 和 π - Σ 相互作用;利用色散关系理论研究光核反应以及介子和重子的散射过程, π -K介子系统可能的对称性和 $|\Delta I=\frac{1}{2}|$ 选择定则,等等。这些学术成果引起国际物理学界的广泛关注。

对于周光召在杜布纳的工作,杨振宁先生这样评价^[14]:

“周光召在杜布纳工作的时期是多产的,他在苏联《实验与理论物理》杂志上发表了 many 文章。当时我在美国研究了这些论文,尤其是他关于赝矢量流部分守恒的工作。他在美国被认为是杜布纳联合原子核研究所最杰出的年轻科学家。”

李政道先生也有过类似评价^[15]:

“周光召是世界著名理论物理学家。20世纪70年代在和他见面之前,我就已经知道他在20世纪50年代末的许多重要工作。他的工作得到国际科学界的高度评价。另外他的文章通常都写的深入和简洁。”

2 核武器理论设计时期(1961—1979)

20世纪60年代初,粒子物理学科发展迅速。此时也是周光召从事科研工作最具创造力时期。他的大多数工作都紧随国际粒子物理学前沿发展,与盖尔曼、南部阳一郎(Y. Nambu)、费曼等活跃在前沿的一批杰出物理学家的关注点相同(盖尔曼和南部正是因在此时期做出的相关杰出工作,后来分别获得诺贝尔物理学奖)。然而,当得知中国原子弹研制需要人才后,周光召带头主动请缨,决定立即回国。1961年2月底,周光召回国担任二机部九院理论部第一副主任,与彭桓武、邓稼先等一批科学家一起,进入中国原子弹研究核心部门。从周光召曾在前苏联《实验与理论物理》杂志上发表的文章可知,在1961年2月27日连续投出两篇论文后,他便放下手中所有研究工作,放弃自己热爱的理论物理和有望取得突破的高能粒子物理前沿研究,回到北京参与到原子弹的研制工作中。以至于1961年5月18日投送到《实验与理论物理》杂志上发表的另外两篇论文,是由他的合作者整理后投稿的,甚至连他自己都不知道。此后近二十年,周光召一直隐姓埋名,停止在学术期刊发表学术论文。

周光召回国前,中国的原子弹研制曾一度陷入困境。理论计算表明,炸药爆炸后在内爆过程中产生的压力总是小于在原子弹设计初期苏联专家留下的教学模型框图。中国科学家历时一年

多, 经历9次繁琐计算后还是得不到与苏联专家一致的数据。彭桓武请周光召复查之前的计算数据。周光召仔细地检查9次计算结果后认为计算没有问题, 怀疑苏联专家数据的可靠性。他从炸药能量利用率着手, 求出炸药所做出的最大功, 从理论上证明用特征线法所做计算结果的正确性, 从而证明苏联专家数据是不正确的, 结束了近一年的争论, 使得中国原子弹研制继续向前推进。随后, 中国科学家逐步获得原子弹爆炸过程的清晰物理规律, 原子弹设计工作得以全面展开, 于1963年底交出包括结构、尺寸和材料的理论设计模型, 然后经过工程设计、部件加工、实验室中各种冷试验、装置组装、核装置运往试验场进行热试验。1964年10月16日, 中国第一颗原子弹爆炸成功。之前鲜有人知道, 周光召在原子弹理论设计中发挥的关键作用。正如当年在周光召带领下参与核武器研制工作的孙清和在他2009年撰写的一篇回忆文章中写到: “现在看来, 如果没有1961年的周光召回国参加我国核武器的理论研究, 我们的第一颗原子弹的进程, 可能要推迟至少1—2年, 甚至2—3年。”⁶⁾ 孙清和还特别强调: “从历史的角度及我个人的亲历看, 我国核武器研制历史充分证明了周光召在我国第一颗原子弹理论突破, 研制与实验过程中的作用是无人替代的。他为了我国国防事业而做出了牺牲他原本热爱的物理专业, 以至于可能丢掉世界诺贝尔奖也是值得的。”

原子弹爆炸后, 周光召等人马上开展对氢弹原理的攻关。1965年夏, 周光召举办一系列报告会, 阐述氢弹结构和爆炸原理, 吸引多位理论部科研人员参与讨论。当时, 负责原子弹和氢弹理论设计的彭桓武设计了三套氢弹研制方案, 分别由周光召、黄祖洽和于敏负责。彭桓武曾回忆说, 原则上三套氢弹研制方案在原理上都是合理可行的, 黄祖洽负责的方案实际上是一个保底的方案。最后, 于敏带领的研究小组率先实现了其中的一个氢弹设计原理。在明确氢弹设计原理之后, 理论部科研人员很快地融合一起, 完善氢弹

理论模型并进行细致的物理设计。于是, 在突破原子弹后两年两个月时间内, 又突破氢弹原理, 取得中国核武器研制中的又一个里程碑式成果。1967年6月17日, 中国第一颗氢弹空投试验成功。

“两弹”研制期间, 周光召在多个学科和研究领域采用边学边研究边应用的方式, 发挥多学科交叉融合优势, 相关的学科和研究领域包括: 高温高密度物理、爆炸力学、流体力学、中子物理学、等离子物理和计算力学等。周光召渊博的知识和超凡的才能为中国原子能事业的发展起到了重要作用。

周光召还在全面推进我国第一代核武器的武器化理论工作和核武器小型化的理论研究以及第二代核武器小型化工作的开展做出了杰出的贡献。

3 重返理论物理学界(1978—1987)

“两弹”研制任务结束后, 周光召逐渐将工作转到他热爱的理论物理研究。20世纪70年代初, 他开始研读与强相互作用渐近自由性质、超对称理论、规范理论、拓扑、微扰论和重整化相关的最新文献。由于长时间无法直接在科学研究的前沿工作, 为了尽快赶上科学前沿的发展, 周光召把自己当作“小学生”, 从查阅最新发表的研究成果和描述新近进展的综述文章学起, 再不断追踪研究的源头, 由此很快了解和熟悉近二十年理论物理的发展, 并在短时间内便又走在学术前沿。尽管不久以后便开始担负越来越繁重的领导工作(1983—1990年担任中国科学院理论物理研究所所长、1984年担任中国科学院副院长), 周光召对科研工作丝毫没有懈怠, 挤出休息时间和假期并带领我国年轻一代的理论物理学家, 站在理论物理前沿不断拼搏, 并取得多项有重要国际影响的研究成果, 得到国内外学者普遍重视。正如他一再强调的, 理论物理只有世界第一, 没有第二。直到1987年他担任中国科学院院长后, 只好又一次放弃他热爱的理论物理事业。

在统计物理方面, 他先期与苏肇冰开始闭路

6) 孙清和(1936—)时任第二炮兵第一研究所研究员, 2001年3月授衔文职将军。

格林函数研究⁷⁾。后又邀请于渌和郝柏林参与这项工作。“四人研究小组”将闭路格林函数用于研究动态临界现象和无序系统，特别是自旋玻璃理论，发表了一系列研究论文。周光召基本构建了整个理论框架，包括生成泛函、费曼规则、非微扰计算和输运方程等^[16]。他意识到闭路可以统一描述平衡与非平衡态的理论，发挥个人自如运用量子场论理论工具的专长，很快构建起新理论框架，给出一个定义在闭合时间回路上的路径积分和相应的生成泛函表示，使有效拉氏量包含系统的非平衡态(或平衡态)统计信息。周光召不满足于理论形式本身，更注重解决具体问题。除激光、等离子体这些典型的非平衡系统外，他特别注意到当时刚发展起来的动态临界现象理论，尤其是临界现象中长波涨落很重要。“四人研究小组”很快发现闭路是描述这类现象的一个自然的理论框架，序参量和守恒量可以统一描述，并通过Ward—Takahashi恒等式直接联系起来。当时得到广泛应用的包含非对易性的Martin—Siggia—Rose经典场论，被证明是闭路格林函数的所谓超玻色极限(场量子非常多而成为静电场)。此外，他们在研究过程中首次发现正则运动和耗散分别可通过广义郎之万方程实系数矩阵的反对称和对称部分来表述。

1978—1989年间，周光召、苏肇冰、郝柏林和于渌完成“关于非平衡量子统计的闭路格林函数”研究，发表了一系列有重要影响的学术论文。此项研究1999年获中国科学院自然科学奖一等奖和2001年国家自然科学奖二等奖(统一描述

平衡与非平衡系统的格林函数理论研究)(图3)。同时，2000年美国ISI(Institute for Scientific Information, ISI)研究所还为周光召、苏肇冰、郝柏林和于渌1985年发表在国际综述杂志上的长篇文章“平衡态与非平衡态形式的统一”^[17]颁发了1981—1998年度经典论文奖。这篇论文已成为物理学界的经典引用文献。

在量子场论和粒子物理方面，周光召除了与戴元本、阿马蒂(Daniele Amati)等国内外知名科学家开展合作交流外，在1983—1987年间组织一批中青年科研人员开展量子场论大范围性质的研究^[18]。较深入研究量子场论的整体拓扑性质，对规范场理论及其有效作用理论，特别是有关量子反常的大范围拓扑性质研究方面，在国际上首先得到规范不变有效作用“量子反常”项的正确形式和存在条件； $2n$ 维空间的非阿贝尔反常、 $2n+1$ 维陈—Simons示性类与 $2n+2$ 维量子反常之间的联系， $2n$ 维非阿贝尔反常的整体形式；推广了陈—Simons示性类，得到了广义陈—Simons示性类和超度公式的一般形式及其简单推导和物理应用，并进行规范群的上同调分析。此项研究获得了1987年中科院重大科技成果奖和1989年国家自然科学奖二等奖(量子场论大范围性质的研究)。

1980年9月，周光召应邀去美国弗吉尼亚大学(The University of Virginia)和加州大学(Univer-

sity of California)任客座教授，受到美国物理学界欢迎，他被国际同行视为中国理论物理学界的代表人物。著名高能物理学家、美国物理学会前主席马夏克(R. Marshak)教授为欢迎周光召来访，专门为他在弗吉尼亚理工学院(Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia Tech)举办了以弱相互作用为题的学术会议，许多国际著名物理学家包括李政道和杨振宁等多名诺贝尔物理学奖获得者前去参加会议。会议期间，多位物理学家表示愿意促进中美科学合作。周光召借



图3 周光召获1989年国家自然科学二等奖(量子场论大范围性质的研究)和2001年国家自然科学二等奖(统一描述平衡与非平衡体系的格林函数理论研究)

7) “闭路”一词起源于1965年诺贝尔物理学奖获得者施温格(J. Schwinger)，他提出了正、负两支回路组成闭合时间回路的想法。

机促成了中国学者赴美学术交流并且帮助中国物理学会恢复了在国际组织中的地位。1981年9月,完成美国访问计划后,周光召受邀赴欧洲核子研究中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)访问、担任研究员。

周光召一直关注弱相互作用的唯象学研究,尤其是与基本对称性破缺相关的物理现象。他一直强调对称性在物理学中的重要性,认为“对称性和对称破缺是世界统一性和多样性的根源”。1984年,周光召研究顶夸克质量和K介子衰变过程中直接CP破坏的关联^[19]。在当时高能物理学界普遍认为顶夸克质量应小于传递弱相互作用的W玻色子质量,包括日本专门建造的寻找顶夸克的加速器其能量也是低于W玻色子质量,而周光召指导研究生预言顶夸克质量应可重于W玻色子质量,否则需要第四代夸克的存在^[20]。1995年,在北京召开第17届国际轻子—光子国际会议,这是中国首次举办高能物理领域大型的重要学术会议。周光召作为大会主席主持开幕式并发表重要讲话。会后,他思考当时高能物理发展的热点问题,包括CP破坏、质量起源、中微子物理、超对称理论、大统一理论的低能唯象等,并考虑在

领导岗位上退下来后继续进行前沿研究。而他自己并没有想到,从领导岗位上退下来后,刚重新回到理论物理前沿开展研究^[21-24],又一次需要他服从党和国家的安排,走上新的领导岗位,再一次放弃他热爱的理论物理和高能粒子物理前沿研究。

4 结语

作为一位享誉世界的理论物理学家、中国科技界的卓越领导人,周光召先生以他高尚的爱国情操、渊博的学术造诣、严谨的科学作风、长远的战略眼光以及对国防和科学事业的杰出贡献,赢得了学术界的高度评价和尊敬。值此周先生从事科学事业65周年之际,我们谨以这篇文章,表达对先生的崇高敬意,并祝愿他90华诞吉祥如意!

致谢 俄罗斯科学院科技史研究所圣彼得堡分所 Diana Saveljeva 副研究员及杜布纳联合原子核研究所 Alexey Zhemchugov 博士协助搜集资料;中国科学院自然科学史研究所王芳副研究员翻译俄文资料。在此,向以上专家谨致诚挚谢意!

参考文献

- [1] 周光召. 物理学报, 1955, 11(4): 299
- [2] 周光召. 北京大学学报(自然科学版), 1955, 1: 53
- [3] 西萨基昂 A N. 核物理动态, 1990, 4: 42
- [4] Chou K C, Shirokov M I. Soviet Physics JETP, 1958, 34: 851
- [5] Chou K C. Soviet Physics JETP, 1958, 35: 543
- [6] Chou K C. Soviet Physics JETP, 1959, 35: 642
- [7] Jacob M, Wick G C. Annals of Physics, 1959, 7: 404
- [8] Chou K C. Nucl. Phys., 1958/59, 9: 652
- [9] Chou K C. Soviet Physics JETP, 1959, 36: 663
- [10] Okubo S. Phys. Rev., 1958, 109: 984
- [11] Chou K C. Soviet Physics JETP, 1961, 12: 492
- [12] Feynman R P, Gell-Mann M. Phys. Rev., 1958, 109: 193
- [13] Sudarshan E C G, Marshak R E. Phys. Rev., 1958, 109: 1860
- [14] Yang C N. Introduction of 《Selected Papers of K.C. Chou》, World Scientific Series in 20th Century Physics, Vol. 42, vii., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Editor Wu Y L. 2010
- [15] Lee T D. Foreword of 《Selected Papers of K.C. Chou》, World Scientific Series in 20th Century Physics, Vol. 42, vii., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Editor Wu Y L. 2010
- [16] 徐冠华 主编. 我们认识的光召同志: 周光召科学思想科学精神论集. 见: 于禄. 周光召治学点滴. 科学出版社. 2019. p315
- [17] Chou K C, Su Z B, Hao B L *et al.* Phys. Rep., 1985, 118: 1
- [18] Chou K C, Guo H Y, Wu K *et al.* Phys. Lett., 1984, 134B: 67
- [19] Chou K C. CP violation from the standard model. Proceeding of Europhysics Topical Conference on Flavor Mixing in Weak Interactions. Ettore Majorana International Sciences Series: Physical Sciences, 20: 609
- [20] Chou K C, Wu Y L, Xie Y B. Chin. Phys. Lett., 1984, 1: 47
- [21] Chou K C, Wu Y L. Phys. Rev. D, 1996, 53: 3492
- [22] Chou K C, Wu Y L. Nucl. Phys. Proc. Suppl., 1997, 52A: 159
- [23] Chou K C, Palmer W F, Paschos E A *et al.* Eur. Phys. J. C, 2000, 16: 279
- [24] Chou K C, Wu Y L. Science in China, 1998, A41: 324