

周光召先生的科学贡献和影响*

于江浩[†]

(中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

2025-03-31 收到

[†] email: jhyu@itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250412

CSTR: 32040.14.wl20250412

周光召先生作为我国“两弹一星”功勋奖章获得者,有着多重身份和卓越贡献。他是一位国际知名的理论物理学家、一位卓越的战略科学家、一位优秀的科技管理者和领导人,本文主要集中在他作为国际知名科学家的身份,介绍他做出的国际一流的科学成果,以及他的工作对相关领域的持续影响力。

周光召先生在理论物理方面的科学贡献主要集中在两个时期:一是在莫斯科杜布纳联合核子研究所时期,他提出了相对论性螺旋散射振幅概念,以及推导出赝矢量流部分守恒定理(PCAC)的奠基性工作;二是在中国科学院理论物理研究所时期,他系统发展了非平衡态量子场论的闭路格林函数数学形式,以及量子场论的大范围拓扑性质。本文会澄清周光召先生在螺旋度振幅方面工作的首创性,叙述周光召先生如何利用PCAC简洁地解决问题,同时阐明这些工作如何影响当代的理论物理发展。

周光召先生从1957年春开始在杜布纳联合核子研究所工作,在这一时期,周光召先生开始相对性粒子自旋态方面的研究^[1, 2]。这一研究起源于莫斯科一场学术研讨会的讨论,周光召与一位莫斯科大学教授的意见相左,他并没有迷信权威,而是真正花三个月时间来思考这一问题。这个问题牵涉到量子场论一个非常基本的问题,什么是粒

子?根据Wigner的理解^[3],粒子是庞加莱群的不可约表示,一个粒子态可以用粒子的动量和自旋来描述。这个定义其实是有模糊性的,粒子的自旋取决于量子化轴的选取。在量子力学中,量子化轴的选取是固定轴,比如 z 轴,量子场论继承了这一选取,这叫做正则自旋。正则自旋的好处在于,在粒子的静止系中,粒子自旋态过渡到非相对论自旋,因此正则自旋很适合描述低能散射振幅。但是对于无质量粒子,由于不存在粒子静止系,正则自旋没有良好定义,这就是为什么需要提出螺旋度自旋。螺旋度自旋的好处在于,旋转变换下螺旋度不变,对于无质量粒子来说,推动之下也是不变的,这些性质非常好地描述了无质量粒子和高能极限下的粒子,因此非常适合高能相对论散射振幅。同时,对于有质量螺旋度,也可以进行描述,和正则自旋态之间可以通过Wigner D 矩阵进行联系。

目前螺旋度大部分文献都引用Jacob和Wick的文章^[4],但是本文想要澄清一下,首先得到螺旋度的应该是周光召先生。在Jacob和Wick的

文章中,他们引用了周光召先生发表在1958年*JETP* (实验和理论物理杂志)上关于任意自旋的有质量粒子的螺旋态(图1)^[1],同时他们在文章中指出,他们关于有质量螺旋度的讨论和周光召先生的讨论是一致的,关于无质量粒子的螺旋度才是创新的。事实真的是这样吗?其实周光召先生在一年以前已经在*JETP*发表了无质量粒子的螺旋度文章(图2)^[2]。我们看一下两篇文章投稿和发表时间。Jacob的文章是在1959年3月投稿,发表在1959年8月,可周光召先生关于无质量粒子螺旋度振幅的文章1958年5月投稿,1959年3月已经发表了俄文版,1959年9月翻译成英文。因此周光召先生的两篇文章^[1, 2]远早于Jacob和Wick的工作,是第一次提出一般自旋粒子的有质量和无质量螺旋度振幅。李政道先生的评价很公允,“他第一次引入相对论性螺旋散射振幅的概念和相应的数学描述”。

螺旋度振幅目前已经广泛应用

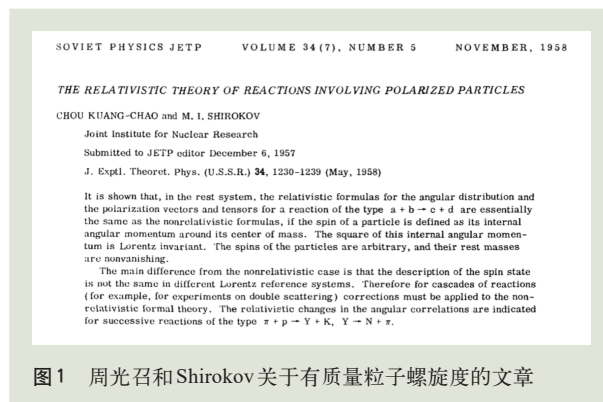


图1 周光召和Shirokov关于有质量粒子螺旋度的文章

* 本文根据2024年5月14日上午在北京应用物理与计算数学研究所与中国科学院理论物理研究所联合举办的“周光召学术思想座谈会”上的报告发言整理而成,谨以此文缅怀周光召先生并作为96周年诞辰纪念。

到粒子物理实验的角分布测量中，这利用了螺旋度的旋转不变性，并不需要进行轨道角动量分解。举一个典型的例子，2012年，希格斯共振态发现以后，为了得到这个粒子的自旋和CP的性质，大型强子对撞机 ATLAS 和 CMS 实验组利用希格斯粒子衰变到 ZZ 的螺旋度振幅决定测量希格斯粒子的自旋和 CP 性质(图3)^[5]，由此可见螺旋度振幅的实用价值。同时，无质量粒子螺旋度振幅，已经成为现代散射振幅理论的基础。螺旋态振幅的小群变换性质，可以完全决定三点在壳振幅的

形式，然后可以利用局域性和么正性、以及 BCFW (Britto—Cachazo—Feng—Witten) 递推关系，可以构建任意高点的树图和圈图的散射振幅^[6]。对于有质量在壳散射振幅，真正有影响的是最近 Arkani—Hamed 等人提出的有质量螺旋度振幅^[7]，螺旋度振幅的使用可以很自然的过渡到无质量散射振幅，因此可以利用无质量散射振幅的很多结论。

周光召先生真正有广泛影响的工作是他在杜布纳做出的赝矢量流部分守恒(PCAC)的工作，他在1961年 JETP 杂志上发表的工作

推导出了赝矢量流部分守恒定理(图4)^[8]，成为国际公认的 PCAC 的奠基者之一。

这项工作的背景是源自1958年 Goldberger—Treiman(GT) 关系^[9]： $g_A m_N = g_{\pi NN} F_\pi$ ，其中 m_N 是核子质量， F_π 是带电 π 介子衰变常数，这个关系在当时看来比较神奇，因为它联系了弱作用贝塔衰变的轴矢耦合常数 g_A (大约是1.27) 以及强相互作用的 π -N-N 耦合强度 $g_{\pi NN}$ (大约是13.4)，和实验测量符合得很好，可是这个关系的理论解释是什么？根据现在的理解，轴

矢量流的强子矩阵元，可以分解为两项贡献，轴矢量洛伦兹结构和 π 介子奇点主导的贡献， π 介子在这里是无质量的赝标粒子(图5)。因为轴矢量流在无质量极限下守恒，这直接导致 GT 关系。当然我们知道 π 介子是有质量的，而且再加上反常的贡献，所以轴矢量流只是部分守恒的。

目前的教科书普遍引用诺贝尔奖获得者 Nambu^[10] 和周光召先生的文章^[8]，有的教科书还会引用 Gell-Mann 和 Levy 的工作^[11]。这里先澄清一下，Gell-Mann 和 Levy 的工作提出了一个模型，虽然抓住了问题的核心，但只能给出 GT 关系的近似形式，其中 g_A 恒等于1，并不能很好地解释实验观测。真正能够解释实验观测的是 Nambu 和周光召先生的文章。Nambu 的文章发表略早(1960年2月提交，3月迅速发表)，以物理解释为主，有着一贯的 Nambu 风格，“Nambu 的文章一般会超前十年，但是理解 Nambu 的文章也需要十年时间”。虽然周光召先生的文章略晚一些(提交于1960年3月，1960年9月发表)，但是给出了现代教科书中使用的简洁且严格的推导，因此他的文章在国际上造成了很大影响。当然 PCAC 的真正威力不只是可以解释 GT 关系，同时联系弱流矩阵元和强散射振幅，它还给出了量子场论很深刻的结论。对于一个一般的标量场理论，PCAC 对拉氏量有很强的限制，拉氏量中所有不含导数的项为零，所有含有导数的项之间存在联系。更为深刻的是 PCAC 导致软 π 定理，在软极限下联系不同的强散射振幅^[12]。周光召先生在60年代回国后不再从事这方面的工作，不然还会做出更大的贡献。在当时，PCAC 对 Nambu—Jona—Lasinio 模型的提

SOVIET PHYSICS JETP VOLUME 36 (9), NUMBER 3 SEPTEMBER, 1959

REACTIONS INVOLVING POLARIZED PARTICLES OF ZERO REST MASS

CHOU KUANG-CHAO

Joint Institute of Nuclear Studies

Submitted to JETP editor May 31, 1958

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 36, 909-918 (March, 1959)

In this paper the group-theoretical point of view is used for the description of the spin states of particles of zero rest mass. Complete sets of operators and of their eigenfunctions for a system of two particles are found in the representation of the momenta and spins. The statistical tensors for the particles produced in a reaction of the type $a + b \rightarrow c + d$ or $a \rightarrow c + d$ are obtained in the case in which one of these particles has no rest mass. The most general selection rules are derived for the reaction $a + b \rightarrow c + d$ in the form of relations between the statistical tensors, under the condition that the space and time particles are conserved. The wave functions are calculated for a system of two identical particles of zero rest mass.

图2 周光召先生关于无质量粒子螺旋度的文章

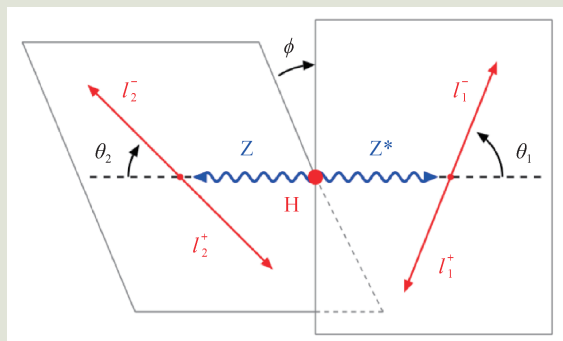


图3 Higgs 粒子衰变到 ZZ 的过程决定了这个粒子的自旋和 CP 性质

SOVIET PHYSICS JETP VOLUME 12, NUMBER 3 MARCH, 1961

ON THE PSEUDOVECTOR CURRENT AND LEPTON DECAYS OF BARYONS AND MESONS

CHOU KUANG-CHAO

Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor April 7, 1960

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 39, 703-712, (September, 1960)

By the use of the analytic properties of a certain matrix element it is shown that the result of Goldberger and Treiman regarding the decay $\pi \rightarrow \mu + \nu$ is valid for wider classes of strong interactions than those found by Feynman, Gell-Mann, and Levy, and in particular for the ordinary pseudoscalar theory with pseudoscalar coupling. A formula is obtained which can be used for an experimental test of the assumptions that are made. Lepton decays of hyperons and K mesons are also discussed.

图4 周光召先生关于赝矢量流部分守恒的文章

出^[13]，以及流代数的提出^[14]，求和规则和反常^[15]，都起到了直接的促进作用。我们现在知道，这些工作一起对低能手征拉氏量以及弱相互作用规范理论的提出起了重大的推进作用(图6)。

PCAC的工作是奠基性的，李政道先生评价说，“他在1960年简明地推导出赝矢量流部分守恒定理，这是他在强子物理研究中做出的出色成果，对弱相互作用理论起了重大的推进作用，因此世界公认他是PCAC的奠基人之一”，杨振宁先生也给予高度评价，“当时我在美国研究了的这些论文，尤其是他关于PCAC的论文”。杨振宁先生后来再次回忆到^[16]，“1980年Robert Marshak在弗吉尼亚理工(VPI)组织了一个国际会议。Marshak组织这个会议，一部分因为周光召在那里访问了一年或者一年半，Marshak非常欣赏周光召的成就，所以他组织了这个会议，参加的人很多。”在网上可以看到这个会议的文集，包括报告和所有讨论的全文^[17]，周光召先生和其他著名专家，包括李政道、Weinberg、吴健雄等人激烈的讨论均记录在案。

周先生在杜布纳的1957—1961五年时间内，在JETP上发表了33篇文章，这个记录在今天也是非常高产的，更何况这些文章的创新性和质量，都是非常之高。杨先生评价道，“他在美国被认为是杜布纳联合核子研究所最杰出的年轻科学家。周光召是个绝顶聪明的理论物理学家，他对理论物理的看法既能从大处看、又能在小的地方想出新的办法来。他这两方面都做的很成功。”

在长达十几年的两弹研制任务结束以后，周光召先生调入新成立的中国科学院理论物理研究所，回

$$\begin{aligned} \langle p | j_{\mu 5}^+ | n \rangle &= \bar{v}_p(p) g_A(0) \gamma_\mu \gamma_5 v_n(p) \\ \langle p | \partial^\mu j_{\mu 5}^+ | n \rangle &= 0 \end{aligned} \quad \begin{array}{c} n \\ \swarrow \\ p \end{array} \begin{array}{c} v \\ \searrow \\ e^- \end{array} + (g_{\pi NN} \bar{v}_p \gamma_5 v_n) \frac{1}{q^2} (i f_\pi q_\mu) \begin{array}{c} n \\ \swarrow \\ p \end{array} \begin{array}{c} \pi^- \\ \searrow \\ e^- \end{array}$$

$$\langle 0 | j_{\mu 5}^+ | \pi^+ \rangle = i f_\pi P_\mu$$

图5 利用赝矢量流部分守恒推导GT关系的示意图

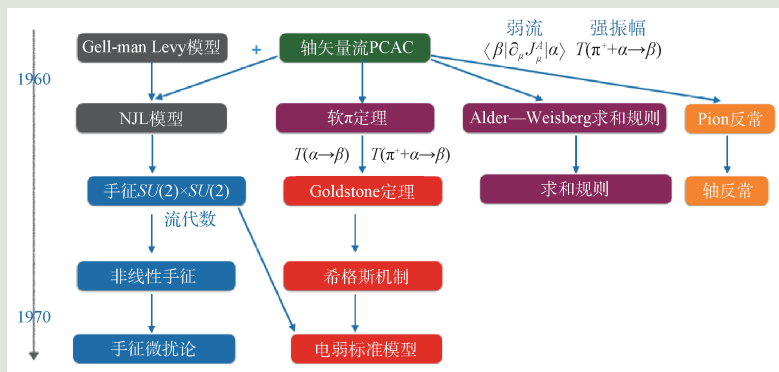


图6 PCAC工作对弱作用领域的推进

到了他一直钟爱的理论物理研究事业。在九所时期，周先生在等离子体物理和辐射输运方面积累了丰富的经验，“周先生敏锐地察觉到托马斯—费米状态方程的量子修正的重要作用。这项研究工作难度很大，当时仅有苏联科学界发表了零星的论文，周先生花了好几个月的时间，用密度泛函和量子场论的方法，推导出闭路格林函数，相比国外较为复杂的研究方法，他的方法更为简洁。”^[18]这些经验使得他很快重回理论物理的前沿，和合作者苏肇冰、郝柏林和于渌一起，组成四人科研小组(图7)。在1978到1986年期间发表系列文章，把量子场论用于处理平衡和非平衡统计物理的统一表述的闭路格林函数方法研究。

量子场论通过虚时间的拓展，过渡到平衡态温度场论，并进一步从入态—出态形式过渡到入态—入态形式的初值问题，最终发展到实时的Schwinger—Keldysh形式。周光召先生四人合作小组采用70年代发展的泛函路径积分形式，第一次系统发展了路径积分形式下的非平

衡态量子场论，并建立起和实时热场论的联系。他们的这一组研究，曾总结在Physics Reports的一篇题为“平衡与非平衡系统的统一表述”的长篇综述中^[19]，在国内外产生了重要影响(图8)。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。

这篇论文已成为物理学界的经典文献，目前多个领域，包括重离子碰撞、粒子宇宙学、凝聚态物理、激光、等离子体、临界现象等，都在引用周光召先生的文章。美国马里兰大学胡悲乐教授在其非平衡态量子场论专著中^[20]，详细介绍了周先生的泛函路径积分形式。Weinberg在早期宇宙方面的工作，也把周先生的文章放在Schwinger—Keldysh的文章之后引用^[21]。2000年美国科学信息研究所为四人小组1985年发表在国际综述杂志上的长篇文章颁发了1981—1998年度经典论文奖^[22]。

四人研究小组的系列工作可以作为中国科学院现阶段提倡的开展有组织科研的典范。1983—1987



图7 周光召、苏肇冰、郝柏林和于渌

PHYSICS REPORTS (Review Section of Physics Letters) 118, nos. 1 & 2 (1985) 1-131. North-Holland, Amsterdam

EQUILIBRIUM AND NONEQUILIBRIUM FORMALISMS MADE UNIFIED

Kuang-chao CHOU, Zhao-bin SU,* Bai-lin HAO and Lu YU

Institute of Theoretical Physics, Academia Sinica, P.O. Box 2735, Beijing, China

Received 5 June 1984

Contents:

1. Introduction	3	5.2. General considerations concerning multi-point functions	62
1.1. Why closed time-path?	3	5.3. Plausible generalization of FDT	67
1.2. Few historical remarks	4	6. Path integral representation and symmetry breaking	70
1.3. Outline of the paper	5	6.1. Initial correlations	71
1.4. Notations	6	6.2. Order parameter and stability of state	76
2. Basic properties of CTPGF	7	6.3. Ward-Takahashi identity and Goldstone theorem	79
2.1. Two-point functions	7	6.4. Functional description of fluctuation	82
2.2. Generating functionals	12	7. Practical calculation scheme using CTPGF	89
2.3. Single time and physical representations	18	7.1. Coupled equations of order parameter and elementary excitations	90
2.4. Normalization and causality	24		
2.5. Lehmann spectral representation	28		

图8 周光召、苏肇冰、郝柏林和于渌关于闭路格林函数的工作

年,周光召先生在中国科学院理论物理研究所期间,组织一批中青年科研人员发展了量子场论的大范围拓扑性质及其与反常的联系,发表系列文章,“引起国内外学者的普遍重视”。周光召先生在九所和理论所期间不断安排科研人员攻关,“周先生安排的课题比较难,但指导

得很细,不但交代研究方法,甚至还提出可供参考的文献。”^[18]周光召先生同时向年轻科研人员强调:“一个有作为的科学家,不仅要重视理论,而且一定要重视实验,要抓住理论与实验结果不一致的地方,发现理论或实验的不足,寻求新的突破。”

“周光召是世界著名的理论物理学家,他的工作得到了国际科学界的高度评价。”“周光召是一位顶尖的物理学家。他视野宽阔,影响力深远,并且能够快速地洞悉新思想。他做物理研究的风格让我想起 Landau、Salam 和 Teller。”这是李政道先生和杨振宁先生对周光召先生的共同评价^[23, 24]。回顾周光召先生的四项贡献以及对领域的影响,这给了我们很多启发。(1)粒子螺旋振幅的工作:思考场论最基础的问题,从而建立起理论的数学框架。(2)赝矢量流部分守恒的工作:对前沿问题的敏锐把握,给出简洁的解决方案。(3)闭路格林函数的工作:四人小组进行科研攻关,“有组织基础研究”的典范。(4)场论大范围拓扑性质的工作:指导和带领中青年物理学家,培养了理论物理的队伍。年轻一代不只要学习他做人、做事、做学问的事迹,更要能够传承他的科学精神!

致谢 感谢吴岳良、张肇西对本文的建议,与孙昌璞的交流亦受益良多。

参考文献

- [1] Chou K C, Shirokov M I. Soviet Physics JETP, 1958, 34: 851
- [2] Chou K C. Soviet Physics JETP, 1959, 36: 642
- [3] Wigner E P. Annals Math., 1939, 40: 149
- [4] Jacob M, Wick G C. Annals of Physics, 1959, 7: 404
- [5] ATLAS Collaboration. Phys. Lett. B, 2013, 726: 120
- [6] Britto R, Cachazo F, Feng B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 94: 181602
- [7] Arkani-Hamed N, Huang T C, Huang Y T. JHEP, 2021, 11: 070
- [8] Chou K C. Soviet Physics JETP, 1961, 12: 492
- [9] Goldberger M L, Treiman S B. Phys. Rev., 1958, 110: 1478
- [10] Nambu Y. Phys. Rev. Lett., 1960, 4: 380
- [11] Gell-Mann M, Levy M. Nuovo Cim., 1960, 16: 705
- [12] Adler S L. Phys. Rev., 1965, 137: B1022
- [13] Nambu Y, Jona-Lasinio G. Phys. Rev., 1961, 122: 345
- [14] Gell-Mann M. Phys. Rev., 1962, 125: 1067
- [15] Adler S L. 2019, arXiv: 1901. 06445 [hep-ph]
- [16] 黄克孙, 杨振宁. 香港中文大学访问记录, 香港中文大学杨振宁档案馆, 2000年
- [17] Marshak R E. AIP Conf. Proc., 1981, 72: 665
- [18] 王建国. 物理, 2024, 53(4): 274; 物理, 2019, 48(5): 301
- [19] Chou K C, Su Z B, Hao B L *et al.* Phys. Rept., 1985, 118: 1
- [20] Calzetta E A, Hu B L. Nonequilibrium Quantum Field Theory. Cambridge, 2022
- [21] Weinberg S. Phys. Rev. D, 2008, 78: 063534
- [22] 吴岳良, 刘金岩. 物理, 2019, 48(5): 295
- [23] 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文集. 北京: 科学出版社, 2010
- [24] 厚德载物, 求真创新, 贺周光召先生从事科学事业65周年. 中国科学院理论物理研究所, 2019

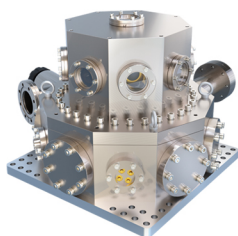
Scryo-S[®]

系列低温恒温器

Scryo-S 系列低温恒温器 (Scryo-S) 具有降温速度快, 变温范围大, 震动小, 噪音低, 设计灵活, 样品可置于真空或超高真空中, 制冷剂使用效率高, 无需定期维护等特点, 并可与 Qcryo 形成不消耗液氮的干式低震动低温系统。



Scryo-S-100
通用型低温恒温器



Scryo-S-200
超高真空低温恒温器



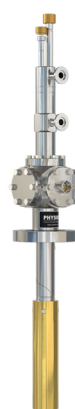
Scryo-S-300
紧凑型显微低温恒温器



Scryo-S-400
超高真空(UHV)低温插件



Scryo-S-500
显微低温恒温器



Scryo-S-600
UHV JT插件

Scryo[®] 系列低温恒温器典型特性

类 型	S-100 低温恒温器	S-200 低温恒温器	S-300 低温恒温器	S-400 低温插件	S-500 低温恒温器	S-600 JT插件
样品环境	真空	超高真空	真空	超高真空	真空	超高真空
温度范围	<1.8K-500K	<2.2K-475K	<1.8K-475K	<1.8K-500K	<1.8K-475K	<1.3K-500K
震动水平	-	<5nm	<10nm	-	<5nm	-
漂移水平	-	<2nm/min	<3nm/min	-	<2nm/min	-
温度稳定	<25mK	<10mK	<10mK	<25mK	<10mK	<10mK
典型应用	紫外 / 可见光 / 红外, THz, 基 质隔离, 穆斯 堡尔谱, 高压 / 高能物理等	STM、AFM、 离子阱、原子/ 分子冷阱、近 场光学椭圆仪 和高能物理等	显微/近场光学、 低维材料、磁光、 拉曼/红外光谱、 高压、X-ray 和 高能物理等	STM、AFM、 ARPES、椭圆 仪、红外、超 快、X-ray 和 高能物理等	显微(磁光)、 低维材料、拉 曼/傅里叶/布里 渊散射、高压 和高能物理等	STM、AFM、 ARPES、椭圆 仪、红外、超 快、X-ray 和 高能物理等

