

# 宇称破坏与对称原理

吴岳良<sup>1,2</sup> 刘金岩<sup>3</sup>

(1. 中国科学院理论物理研究所 100190; 2. 国际理论物理中心(亚太地区),  
中国科学院大学 100049; 3. 中国科学院自然科学史研究所 100190)

六十五年前李政道和杨振宁提出了具有划时代意义的弱相互作用中宇称不守恒定律,随后得到吴健雄等人实验的验证,彻底打破了人们关于对称原理的认识和理解,对称原理不再仅仅是包含对称性和守恒律。从此,对称破缺与对称性共同构成对称原理,成为自然界遵循的普遍规律。

当我们今天回望宇称守恒定律被推翻的那个激动人心的时刻,李政道、杨振宁、吴健雄敢于冲破物理上先验性观念的科学精神再次给予我们深深的启示。就在实验验证弱相互作用下宇称(parity)破坏后不久,1957年2月23日,中国科学院物理研究所<sup>1</sup>副研究员于敏在《人民日报》发表题为《宇称守恒定律是怎样被动摇的》文章,向大众普及介绍宇称不守恒定律的理论提出和实验验证过程以及其可能的深远影响。于敏先生在文章强调:“从1957年起,物理学家们将在一种新的启示下去考虑各种重大的理论问题。今天还无法估计它将在人们对于微观世界规律的认识上起着什么样的重要作用。”

事实表明,弱作用下宇称(P)不守恒定律的提出,极大地改变了人们对物质世界对称性的基本观念,促使物理学界全面检验基本守恒定律,不仅导致电荷共轭(Charge Conjugation)对称性、电荷共轭-宇称反演(CP)联合对称性破坏的发现,还促进弱作用理论的蓬勃发展,导致电弱统一理论的建立。时至今日,这一重要发现还在深刻地影响着粒子物理的不断发展。

## 一、宇称不守恒定律的提出与实验验证

第二次世界大战后,受益于战时成功研制原子

弹以及电子学、真空技术和低温技术等先进技术发展,粒子物理领域获得充分经费支持并迅速发展。随着实验物理学家已在宇宙线中发现了正电子、 $\mu$ 子、K介子、 $\pi$ 介子,欧美强国纷纷兴建高能粒子加速器,由此开启在实验室发现新粒子之门,相继产生和发现一系列介子、重子和共振态粒子。这一时期基本粒子研究主要集中在(3,3)共振态(即 $\Delta$ 粒子)和新粒子的识别与分类。其中,基于1953~1955年积累的K介子实验研究, $\theta$ - $\tau$ 疑难成为粒子物理学界“最令人烦恼的问题”。所谓 $\theta$ - $\tau$ 疑难,是指 $\theta$ 和 $\tau$ 粒子质量和寿命几乎相同,但其衰变模式不同,分别衰变为两个 $\pi$ 介子和三个 $\pi$ 介子。有物理学家提出 $\theta$ 和 $\tau$ 是同一种K介子的两种衰变方式。不过这种观点与当时物理学界公认的宇称守恒定律相矛盾。因为分析实验结果可得 $\theta$ 粒子衰变成的两个 $\pi$ 介子系的宇称为正,而 $\tau$ 粒子衰变成的三个 $\pi$ 介子系的宇称为负。因而, $\theta$ - $\tau$ 疑难成为1956年4月初举行的罗切斯特会议讨论的焦点之一。

通常每一种对称性对应于一种守恒律,对称和守恒一直被视为是物理学的基础。1927年,维格纳(E.P. Wigner)提出宇称守恒定理,即系统在经过镜像变换前后运动规律基本保持不变,只是左右相反,例如顺时针旋转的表针在经过镜像变换后则会逆时针旋转。在确立 $\theta$ - $\tau$ 疑难之前,这一对称性定律广泛应用于原子、分子和核物理和 $\beta$ 衰变研究,物理学家自然地认定它们是守恒的,将其作为探究基本粒子相互作用规律的指导原则。在没有物理学家洞察到可将弱作用的宇称守恒和强作用的宇称守恒分开考虑的情况下,任何有关宇称不守恒的讨论,

立即会遭遇观念和实验上的困难。正是 $\theta$ - $\tau$ 疑难的确立,首次引导物理学家重新深刻地考虑宇称问题。

$\theta$ - $\tau$ 疑难问题的突破,得益于李政道和杨振宁在1956年合作完成的划时代工作。李政道1943年考入浙江大学并于第二年转入西南联合大学。1946年赴美留学,就读于芝加哥大学,在著名物理学家费米(E.Fermi)指导下研究理论物理,1950年获博士学位。此后,李政道相继任教于芝加哥大学、加利福尼亚大学伯克利分校、普林斯顿高等研究院和哥伦比亚大学。杨振宁早于李政道两年(即1948年)获得芝加哥大学博士学位,他当时的导师是泰勒(E. Teller),此外他也是西南联合大学毕业生(1942和1944先后获学士和硕士学位)。李政道在芝加哥大学时以及在以后的一段时间内同杨振宁建立了密切的合作关系<sup>11</sup>。例如,他们合作研究了基本粒子理论和统计力学领域的介子与核子和轻粒子的相互作用、二维伊辛模型的磁化率、规范场理论等。

1956年上半年, $\theta$ - $\tau$ 疑难是李政道和杨振宁讨论的重点(图1)。经过几次富有成效的讨论和查阅大量文献,二人发现,尽管在核物理和 $\beta$ 衰变中已广泛应用宇称守恒的先验性的假定,但在弱相互作用中并不存在宇称守恒的任何证据。为此,他们在不预设弱作用下宇称守恒的情况下,各自独立地重新严格推导和计算与弱作用相关的物理过程,并提出强有力的论据,说明违反这一定律的可能性。同时,他们提出一些关于 $\beta$ 衰变以及超子和介子衰变的实验,为检验宇称是否守恒提供必要的证据<sup>12</sup>。



图1 1956年夏,李政道同杨振宁在布鲁克海文实验室访问时讨论所用的手写板

(采自 <https://www.bnl.gov/bnlweb/history/nobel/1957.php>.)

1956年10月,李政道和杨振宁在《物理评论》(*Physical Review*)第104卷上联合发表题为《弱相互作用中宇称守恒的问题》(Question of parity Conservation in Weak Interactions)的文章<sup>13</sup>。关于宇称破缺的历史背景和物理思想的提出过程,李政道和杨振宁都曾做出过各自的回忆。可以肯定的是,那时若没有两位具有深刻物理洞察力和扎实物理功底的物理学家的精诚而紧密的合作,宇称不守恒定律的突破和发现必将会探索一段漫长的时间。

在李政道和杨振宁发表弱相互作用下宇称不守恒工作三个月后,实验物理学家以两项重要实验验证了弱相互作用下的宇称破坏。其中一项就是大家熟知的吴健雄与华盛顿国家标准计量局(NBS: National Bureau of Standards)安布勒(E. Ambler)等合作者完成的测量极化核钴60的 $\beta$ 衰变的电子角分布<sup>14</sup>。据吴健雄回忆,李政道在1956年初春到她办公室拜访并向她解释 $\theta$ - $\tau$ 疑难,指出 $\theta$ - $\tau$ 疑难可能是由于弱相互作用下宇称不守恒<sup>15</sup>,且这种破坏应该在极化核 $\beta$ 衰变的角分布中观测到。吴健雄此时已是 $\beta$ 衰变实验研究领域权威,她之前进行的实验研究逐步纠正了1934~1948年间物理学界在 $\beta$ 衰变研究方面的谬误,否定Konopinski-Uhlenbeck理论并确立费米理论的正确性,从而把 $\beta$ 衰变研究推向一个新的阶段。吴健雄认为自己不应错过这一“黄金机会”,于是果断取消已经安排好的参加高能物理国际会议和远东旅行计划而开始着手准备该实验。国家标准局的低温物理学家安布勒也有兴趣合作开展这项实验。他们汇集各自专长,在1956年圣诞节前夕得出电子不对称性是“可重复的和巨大的”(图2)。1957年1月2~8日,吴健雄小组完成所有的实验检查,最终确定弱作用下宇称破缺。在得知吴健雄小组的初步实验结果后,哥伦比亚大学的加温(R. Garwin)、莱德曼(L. Lederman)和温里克(M. Weinrich)在短时间内完成了验证宇称不守恒的另一项实验<sup>16</sup>。

1957年1月15日,哥伦比亚大学召开盛大的新闻发布会,对外宣布该校在实验验证弱相互作用下宇称破缺的新发现(图3)。诺贝尔奖得主拉比(I.I.



图2 吴健雄小组在做弱相互作用中宇称不守恒实验时所用仪器的等比模型  
(原实验设备现存在美国国家标准计量局, 刘金岩摄于东南大学吴健雄纪念馆)

Rabi)在会议上称:“从某种意义上说,一个相当完整的理论结构从其根基上就被打碎了,我们不确定这些碎片将如何被拼凑起来。”同年2月15日,吴健雄小组和加温小组关于宇称破缺的实验结果发表在*Physical Review*第105卷。同一卷中还发表了芝加哥大学特莱格迪(V. Telegdi)和弗里德曼(J. Friedman)的文章<sup>⑤</sup>。他们的实验是用摄影感光乳胶作为检验手段,利用 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ 的级联衰变过程(即 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ ;  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \nu$ ),研究 $\mu^+$ 的初始运动方向与级联衰变 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ 中正电子发射方向之间的相关性,以测量两种衰变相互作用中是否存在宇称破缺。

事实上,在实验验证弱作用下宇称不守恒之前,物理学界并没有立即接受李-杨的观点,甚至有一些权威物理学家公开反对这一观点。据特莱格



图3 1957年1月15日,哥伦比亚大学召开新闻发布会宣布推翻宇称不守恒定律,前排右起为李政道、吴健雄,后排左1为安布勒  
(图片采自《印象·李政道》(上海交通大学出版社,2014))

迪回忆,“大约在1956年8月,我在马歇尔(L. Marshall)的桌子上碰到了一份预印本:李和杨关于宇称破坏和 $\theta$ - $\tau$ 的经典文章。这篇文章立刻让我感到非常兴奋。很明显, $\pi$ - $\mu$ 级联衰变可以很容易地在乳胶中研究;而且我还感到,如果宇称破坏效应能有效解释 $\theta$ - $\tau$ 之谜,那么这种效应就不会小。我就李-杨的论文举行了一次研讨会,徒劳地试图向其他人传达我的兴奋。我遇到了一些资深的同事,他们试图告诉我,我们会浪费时间。我回答说,我愿意冒着浪费三个月时间的风险来研究这样一种令人兴奋的可能性。”<sup>⑥</sup>泡利(W. Pauli)也质疑宇称不守恒,在他给魏斯考普夫(V. F. Weisskopf)的一封信中曾写道:“我不相信上帝是一个弱的左撇子,而且我准备打个大赌,实验将证明电子的角分布是对称的”。

然而,当实验验证弱作用下宇称确实破坏后,物理学界普遍迅速接受这一事实。1957年1月27日,当泡利收到实验结果的预印本后,他给魏斯考普夫写信:“现在,在第一次冲击结束后,我开始缓过神儿来。是的,这很有戏剧性……我感到震惊的不是上帝偏爱左手的事实,而是当他在强作用中表达自己的时候,似乎仍然是左右对称的。简而言之,现在的实际问题似乎是这样的。为什么强相互作用是左右对称的?”几天以后,在纽约召开美国物理学会年会,其中一个专题为宇称专题,尽管这是一个临时安排的专题会(即“会议报名截止时间”后的专题会),当时使用的最大会场也挤满了观众。有物理学家调侃“只差吊灯上没吊满人”<sup>⑥</sup>。

随后,世界各地的许多物理实验室迅速开展数百项关于宇称和电荷共轭(Charge conjugation)的实验。紧接着,李、杨被授予1957年诺贝尔物理学奖。一项理论发现在如此短时间内被授奖,这在诺贝尔奖历史上也极为罕见。诺贝尔物理学委员会成员克莱因(O. B. Klein)教授在这次颁奖致辞中预言这一革命性发现将引起的物理学新进展<sup>⑦</sup>:“事实上,我们大多数人都倾向于将基本粒子的左右对称性视为自然界左右对称性一般原则的必然结果。由于李和杨以及受他们启发的实验发现,我们现在

知道这是一个错误……通过你们始终如一的和无偏见的思考,你们已经打破基本粒子物理领域最令人困惑的僵局,现在实验和理论工作由于你们的辉煌成就而涌现出来。”

可以说,李政道和杨振宁的合作既是两人科学生涯中极其重要的机缘,也是科学发展史上一次极其难得的巨大成功。他们都成为了科学史上共同合作的受益者,激励着学术界的进一步交流合作,并取得更大的成功。

## 二、宇称不守恒定律引发的奠基性进展与划时代影响

提出弱作用下宇称不守恒后,一个很自然的问题是将其延展到时空和物质的其他基本对称性。恰好此时,莱德曼及其合作者在1956年9月份发表文章宣称利用云室观测到长寿命中性K介子(当时称为 $\Theta_2^0$ )<sup>①</sup>。基于盖尔曼(M. Gell-Mann)和派斯(A. Pais)在此前一年提出的理论,长寿命中性K介子被广泛应用于证明C对称性的守恒律。不过,进一步研究表明此发现与C守恒并无关系。事实上,就弱作用而言,与宇称对称的情形类似,并没有实验证明C或时间反演(T),或CP、CT及PT是守恒的。那些能检验上述对称性的实验也指出他们只在CPT守恒的基础上分析全部的 $K_L^0$ 和 $K_S^0$ 结构。1956年底,李政道、厄姆(R. Oehme)与杨振宁研究了弱相互作用下宇称破坏与电荷共轭不变性及时间反演不变性之间的关系,特别讨论了 $K^0$ 和 $\bar{K}^0$ 的衰变模式<sup>②</sup>。他们假设C、P和T在强相互作用是守恒的,但在弱相互作用中不一定守恒<sup>v</sup>。这为1964年克罗宁(J. W. Cronin)、菲奇(V. L. Fitch)及其合作者克里斯坦森(J.H. Christenson)、特莱(R. Turley)在另一种关于两种类型的K介子(当时被称为 $K_1^0$ 和 $K_2^0$ )的实验中发现K介子弱衰变中的CP和T破坏提供了理论基础<sup>③</sup>。克罗宁和菲奇也因此发现被授予1980年诺贝尔物理学奖。

宇称破坏被实验验证后,李政道与杨振宁又提出二分量中微子理论。这篇文章是1957年1月17

日投稿至*Physical Review*,文中给出可用于实验检验的理论结果<sup>④</sup>。二分量中微子理论要求中微子质量必须为零,其波函数为二分量而非通常的四分量,即中微子的自旋只能反平行于其运动方向,而反中微子的自旋只能平行于其运动方向。或者说,中微子总是左旋的,而反中微子总是右旋的。在该理论下,宇称将被最大程度破坏。朗道(L.Landau)和萨拉姆(A.Salam)也分别提出类似理论。

宇称定律被推翻后促使物理学家深入探索弱作用的内部机制。早在1934年,费米曾提出原子核的 $\beta$ 衰变理论,选取矢量(V)流-流耦合的形式。但随着 $\beta$ 衰变的研究深入,费米的矢量流-流耦合表现出局限性。此外,由于缺乏对弱流形式的先验性的限定,物理学家通常采用矢量V、标量S、张量T、轴矢量A和赝标量P的线性迭加作为普遍形式,并由实验来限定。1957年,费曼(R.P.Feynman)与盖尔曼合作确定了弱作用可能具有最大宇称破坏的V-A形式。罗彻斯特大学的马夏克(R.Marshak)与研究生苏达珊(E.C.G.Sudarshan)也提出类似理论。到了60年代,格拉肖、温伯格和萨拉姆基于最大宇称破坏的V-A形式建立了弱电统一模型,并荣获1979年诺贝尔物理学奖。1972年,特霍夫特('t Hooft)和维特曼(Veltman)发展了量子场论维数正规化方法,证明了电弱统一模型和量子规范理论是可重整的理论,从而获得了1999年诺贝尔物理学奖。

20世纪70年代,李政道对时空和物质的基本对称性和对称破缺提出了更深刻的观点。1973年,他提出CP对称性自发破缺机制来理解CP破坏的起源,指出体系的拉格朗日密度在CP变换下不变,但真空并不是CP不变的,致使物理反应有CP不守恒现象<sup>⑤</sup>。该理论指出除自旋为1的规范场和已知的物质场外,最简单形式还应包括两个自旋为零的标量场。通过Goldstone和Higgs的对称性自发破缺机制,两个标量场的真空期待值的相对位相作为对称性自发破缺后CP破坏的源,并应用到阿贝尔和非阿贝尔规范群对称性自发破缺的模型中。1974年5月30日,毛泽东主席在中南海寓所接见李

政道,同他探讨物理学中的对称性问题。李政道还做简单的实验向毛泽东演示对称原理。他们的讨论内容还涉及粒子与反粒子的对称关系以及这些粒子的产生和湮灭过程等其他物理专题<sup>⑩</sup>。

基于李政道 CP 对称性自发破缺机制,我们详细分析和系统研究了双希格斯二重态模型,放弃所谓的自然味守恒假设和分立对称性,完整地建立自洽的 CP 对称性自发破缺双希格斯二重态模型<sup>⑪</sup>,模型表明由真空的单个 CP 位相可诱导出丰富的 CP 破坏源,并可分为四类。此模型不仅可解释标准模型中 CP 破坏位相<sup>⑫</sup>的起源,还得到一类新的 CP 破坏源,同时可给出中性流改变的具有超弱相互作用<sup>⑬</sup>的 CP 破坏以及由标量和赝标量希格斯粒子之间混合引起的 CP 破坏源。

通常把 CP 破坏分为间接 CP 破坏和直接 CP 破坏。上文中提到的克罗宁和菲奇等人发现的 CP 对称性破坏是由中性 K 介子及其反粒子之间的相互转化而引起的,称为间接 CP 破坏。这样的 CP 破坏既可以由弱相互作用引起,也可由新的超弱相互作用(super weak interaction)引起。为区分这两种基本相互作用的 CP 破坏,必须测量由衰变振幅引起的直接 CP 破坏。因在超弱相互作用的模型中直接 CP 破坏为零,而在弱相互作用模型中直接 CP 破坏不为零。为此,深入研究和精确测量直接 CP 破坏对探索自然界新的理论和 CP 破坏的起源有着重要意义。在实验方面,欧洲核子中心和美国费米国家实验室首次在中性 K 介子衰变中确立了自然界中直接 CP 破坏的存在<sup>⑭</sup>。此外,美国 SLAC 和日本 KEK 在两个 B 介子工厂上也观测到 B 介子衰变中直接 CP 破坏的证据<sup>⑮</sup>。理论上对 K 介子衰变中直接 CP 破坏给出了自洽的预言<sup>⑯</sup>,与欧洲和美国两个重要实验测量的实验结果相一致。由此,直接检验了粒子物理标准模型中的 CP 破坏机制,排除了第五种纯超弱相互作用理论。同时,对与直接 CP 破坏相关联的  $\Delta I=1/2$  同位旋选择规则给出了自洽的解释。另外,粒子物理标准模型的 CP 破坏位相也可对 B 介子衰变中的直接 CP 破坏给出自洽的解释<sup>⑰</sup>。

### 三、结束语

纵观粒子物理近 60 年发展,尽管宇称守恒的瓦解在物理学家的自然观中并不像诸如由亚里士多德动力学到牛顿动力学或由牛顿力学到相对论或量子力学的冲击之大,但其重要性和根本性足以被视为革命性的。不同于迈克尔逊-莫雷测定光速实验是受技术制约,宇称不守恒理论和实验上的进展必须敢于打破传统物理观念和先验性观念的束缚。在实验验证弱作用下宇称确是破缺之后,直接导致一批物理学家涌入这一领域,短时间内弱相互作用领域的理论和实验文章数量激增。目前,实验已经证明时空和物质的三种基本分立对称性 C, P, T 及其双线性乘积的联合对称性 CP、PT、TC、CT 等都只是近似成立,但三者乘积的联合对称性 CPT 或其排列组合仍是保持严格的对称性质。

2006 年,美国物理学会物理学史论坛在 April Meeting 组织纪念“发现弱作用下宇称破坏 50 周年”活动。李政道应邀出席并做题为《New Insights to Old Problems》的特邀报告(李政道最终选择将这篇发表在 *Chinese Physics B* 杂志,以支持中国的学术期刊。T.D.Lee. New insights to old problems. *Chin. Phys.* 2006, 15(6): 1125-1133.)。他在报告中指出“在发现弱相互作用中宇称不守恒 50 年后,我们可能还保持在探索基础物理中所有对称性破坏起源的起步阶段。”事实亦是如此。人类探索物质微观组成及其运动规律的脚步从未停止,而且还有很长的路要探索。对称性、守恒定律和对称性破缺在物理学尤其是在粒子物理学中起着越来越重要的作用。李政道把对称和对称破缺作为 21 世纪科学所面临的四大问题中的第一个问题,他指出:“第一个问题,宇宙有三种作用:强作用、电弱作用、引力作用。这三种作用的基础都是建立在对称的理论上的。可是实验不断发现对称不守恒,为什么我们的理论,尤其是在 20 世纪 50 年代发现宇称不守恒以后似乎应越来越不对称,但实际不然,理论越来越对称,而实验越来越多地发现不对称。”这启示人们深入研究自发对称破缺机制,尤其是动力学诱导的

自发对称破缺机制。一个自然的想法就是宇称对称性也是自发破缺的。最近研究表明,在超统一场论<sup>⑬</sup>中自然得到宇称对称性是守恒的,并预言镜像轻子和夸克的存在,当超统一场论动力学演化得到粒子物理标准模型时,宇称对称性必须是自发破缺的。

事实表明,对称和对称破缺的研究不仅是20世纪物理学的主旋律,而且仍然是21世纪物理学所面临的重要挑战之一。由对称和对称破缺构成的对称原理不仅在粒子物理中起着重要作用,在整个自然科学的研究中也起了非常重要的作用。现实世界在各个层次上都呈现出与对称性和对称破缺有关的各自特有的基本规律。可以说,对称和对称破缺是世界统一性和多样性的根源。

李政道先生是享誉世界的理论物理学家,他在高能物理、粒子物理、天体物理等研究领域成绩斐然。值此李先生95华诞之际,我们谨以这篇文章,表达对先生的崇高敬意,并祝愿他身体健康,吉祥如意!

## 参考文献

- ① T. D. Lee, C. N. Yang, Question of Parity Conservation in Weak Interactions, *Phys. Rev.* 104, 254 (1956).
- ② C. S. Wu, R. W. Ambler, D. D. Hoppes & R. P. I Judson. *Phys. Rev.* 105, 1413 (1957).
- ③ C. S. Wu, *Adventures in Experimental Physics* (Vol. Gamma), ed. B. Maglich, World Science Communication, Princeton, 1972, p. 101.
- ④ R. L. Garwin, L. M. Lederman & M. Weinrich. *Phys. Rev.* 105, 1415 (1957).
- ⑤ J. L. Friedman and V. L. Telegdi, *Phys. Rev.* 105, 1681 (1957).
- ⑥ A. Franklin, *Studies in History and Philosophy of Science*, 10, 201-257 (1979).
- ⑦ K. Lande, E. T. Booth, J. Impeduglia, L. M. Lederman, and W. Chinnowsky, *Phys. Rev.* 103, 1901 (1956).
- ⑧ T. D. Lee, R. Oehme and C. N. Yang, *Phys. Rev.* 106, 340 (1957).
- ⑨ J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay. *Phys. Rev. Lett.* 13, 138 (1964).
- ⑩ T. D. Lee, C. N. Yang, Parity Nonconservation and a Two-Component Theory of the Neutrino, *Phys. Rev.* 105, 1671 (1957).
- ⑪ T. D. Lee. *Phys. Rev. D* 8, 1226 (1973); *Phys. Rep.* 9, 143 (1974).
- ⑫ 李政道著,朱允伦译. 对称, 不对称和粒子世界. 北京: 北京大学出版社, 1992:1.
- ⑬ Y. L. Wu and L. Wolfenstein, Sources of CP Violation in the Two-Higgs Doublet Model, *Phys. Rev. Lett.* 73, 1762 (1994); L. Wolfenstein and Y. L. Wu, *Phys. Rev. Lett.* 73, 2809 (1994); Y.L. Wu, A Model of CP Violation, pp 80, CMU-HEP94-01, hep-ph/9404241, 1994.
- ⑭ M. Kobayashi and T. Maskawa, *Prog. Theor. Phys.* 49, 652 (1973).
- ⑮ L. Wolfenstein, *Phys. Rev. Lett.* 13, 562 (1964).
- ⑯ NA48 Collaboration, J.R. Batley, et al., *Phys. Lett. B* 544, 97 (2002); KTeV Collaboration, Alavi-Harati, et al., *Phys. Rev. D* 67, 012005 (2003).
- ⑰ Belle Collaboration, K. Abe et al., *Phys. Rev. Lett.* 93, 021601 (2004); BaBar Collaboration, B. Aubert, et al., *Phys. Rev. Lett.* 93: 131801 (2004).
- ⑱ Y. L. Wu, *Phys. Rev. D* 64 016001 (2001); Y. L. Wu, invited talk at the 26th Intern. Conf. on High Energy Physics, Dallas, Texas, USA, 1992, ICHEP92 Proceedings, PP 506, edited by James R. Sanford, (American Institute of Physics); invited talk at the 25th Int. Conf. on High Energy Physics, ICHEP90 Proceedings, pp 1230, edited by K.K. Phua and Y. Yamaguchi, (World Scientific Pub. Co.)
- ⑲ Y. L. Wu and Y. F. Zhou, *Phys. Rev. D* 71 021701 (2005).
- ⑳ Y. L. Wu, Hyperunified field theory and gravitational gauge - geometry duality, *Eur. Phys. J. C* 78, 28 (2018) (arXiv:1712.04537); Y. L. Wu, The foundation of the hyperunified field theory I - fundamental building block and symmetry, arXiv:2104.05404; Y. L. Wu, The foundation of the hyperunified field theory II - fundamental interaction and evolving universe, arXiv:2104.11078.

注:

- I 中国科学院物理研究所的前身是1951年成立的近代物理所,1958年更名为原子能研究所,1973年在原子能研究所一部基础上成立高能物理研究所。1960年底,于敏由基础研究转向研究氢弹工作。
- II 据杨振宁回忆:1953年,李到哥伦比亚大学任教。为了继续我们之间的合作,我们定了互访的约定。我每周抽一天时间到哥伦比亚大学,而他在每周拿出一天到普林斯顿(或者布鲁克海文)来。
- III 此前,也有人提出宇称不守恒想法,但仅作为逻辑上的可能性,而未被给予物理上的分析和解释。
- IV <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1957/ceremony-speech/>.
- V 这篇文章完成于1956年12月,正式发表于1957年4月。据李政道回忆,他们在写这篇文章时并不知道吴健雄的实验结果。在他完成这篇文章当晚,接到吴健雄从火车站打来的电话,告诉他实验结果证明宇称在弱作用下破坏。

资助项目:中国科学院青年创新促进会项目(2018186)

作者简介:吴岳良,中科院院士,中科院理论物理研究所研究员,中国科学院大学学术副校长,亚太国际理论物理中心主任。1987年得到李政道先生推荐赴德国多特蒙德大学做博士后研究。

刘金岩,中国科学院自然科学史研究所副研究员,中国科学院青促会会员,研究方向为现代物理学史,特别关注粒子物理及其在中国的发展史。