

# 弱相互作用的历史<sup>\*†</sup>

李政道

上个世纪末，在发现 $\beta$ 衰变的时候，关于弱相互作用是一个不同的物理作用力的想法，其演化是很缓慢的。只有当实验上发现了其它弱作用，如 $\mu$ 衰变、 $\mu$ 俘获等等，并且理论上认识到所有这些作用能够近似地用同一个耦合常数来描述之后，这一看法才变得明朗起来，才产生了普适的弱相互作用的想法。只有在此之后，人们才慢慢地认识到，弱相互作用力形成一个独立的领域，或许可与万有引力、电磁力和强作用核力及亚核力等等量齐观。

在准备这份讲演时，我又一次感到，所谓某些“早期发展”相对说来并不是那么遥远。实际上，从只有 $\beta$ 衰变一类现象到现在称之为“弱相互作用”的整个领域，它的形成过程大部分都是在我积极投身物理学之后发生的。而我当然认为自己的（或者不如说，我乐意认为自己的）主要科学生涯将来还会有所发展。

## 一. 早期历史

弱相互作用问题的困难是，在理论方面，自从1930年代初泡利<sup>[1]</sup>引进中微子的概念和费米<sup>[2]</sup>做出了 $\beta$ 衰变相互作用的唯象拉氏量之

---

\* 本项研究是由美国原子能委员会部分赞助。

† 原文见 T.D. Lee: *History of Weak Interaction, Elementary Processes at High Energy*, Academic Press Inc., New York, 1971 和

T.D. Lee, *Selected Papers*, Edited by G. Feinberg, Birkhauser, Boston Inc., 1986, Vol. 3, p. 475 。

后，人们相信已经有了完整的理论。几乎所有随后的理论发展，在很大程度上，仅仅是在同一基本思想的基础上做修正和改进。费米公式的成功给人以深刻的印象，它使我们能用一个参数，即费米耦合常数  $G$ ，去描述所有已知的极为复杂的弱相互作用，即从不同核的各种允许和禁戒  $\beta$  衰变到其它各种包括轻子、介子和超子在内的弱过程。此处  $G$  与核子质量  $m_N$  有以下关系 ( $\hbar = c = 1$ )

$$G \approx 10^{-5}/m_N^2, \quad (1)$$

当然，我们知道，费米理论只是一个唯象理论；它的成功也意味着，已知的大量弱过程实际上对这一基础理论是不灵敏的，因此难于取得更进一步理论上的进展。

在实验方面，困难仍在于那些存在着错误但又有说服力的实验结果的存在。从一开始， $\beta$  衰变实验就走过了一条曲折的道路。首先，它的谱具有许多不连续的谱线；当然，随后证明这一结果是错误的。尽管如此，在早期量子跃迁的日子里，从理论上不连续谱比连续谱更容易理解。在费米理论之后一个很长时期里，理论的预言仍与实验结果不一致。精确的  $\beta$  衰变谱是由劳逊 (Lawson) 和考克 (Cork) <sup>[3]</sup> 在 1940 年观察到的，在低能量范围里，只是在  $\beta$  射线发现 50 年之后，在 1949 年才由吴健雄和她的合作者观察到<sup>[4]</sup>。因此，我们对现在  $\kappa_{\ell 3}$  谱里的不确定性以及  $CP$  破坏的混乱状态不应该感到过分不安。

当我 1946 年在芝加哥大学开始做物理学研究生的时候， $\pi$  介子还不为人知。费米和泰勒 (Teller) <sup>[5]</sup> 刚刚完成了他们对康凡西 (Conversi)，皮西奥尼 (Piccioni) 和潘西尼 (Pancini) <sup>[6]</sup> 的重要实验的理论分析；他们得出结论，当时在宇宙辐射中发现的介子不可能是汤川假设的强作用力的传递者。这点，至少对于我这个年轻的研

究生说来，看起来似乎十分可能，按照二级微扰公式， $\beta$  衰变相互作用变成非常奇异，或许它就可能是强核力。那时候，人们认为对  $\beta$  衰变相互作用已经了解得相当好了。费米最初的矢量耦合公式

$$G(\psi_n^\dagger \gamma_4 \gamma_\lambda \psi_p) (\psi_e^\dagger \gamma_4 \gamma_\lambda \gamma_5 \psi_\nu) \quad (2)$$

毕竟是太简单了；为了和事实一致，它应该扩展为包括伽莫夫-泰勒 (Gamow-Teller) 项。[当然，在这里  $\gamma_5$  的出现并没有物理意义。然而，奇怪的是费米为什么要选择这个特殊的表达式，它与  $\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$  相互作用相似，但宇称是守恒的。]

一年之后，由鲍威尔 (Powell) 和他的同事们通过  $\pi - \mu - e$  衰变过程发现了  $\pi$  介子，戏剧性地证实了汤川原来的想法。较高阶的  $\beta$  相互作用是奇异的这个事实并不能说明它就会变成强相互作用。因此，看来把  $\beta$  衰变看作是属于新的一类相互作用是比较合理的。由此出发，在芝加哥的几位研究生，罗森布鲁斯 (Rosebluth)、杨振宁和我<sup>[7]</sup> 1948 年开始了较为系统的研究，看看除去  $\beta$  衰变之外，是否还存在可能属于这同一类的相互作用。

当我们发现，如果  $\mu$  衰变和  $\mu$  俘获用类似  $\beta$  衰变的 4-费米子相互作用来描述的话，它们所有的耦合常数就是同一大小。我们自然要去找我们的老师费米<sup>①②</sup>，把我们的发现告诉他，包括我们的推测，基本的弱相互作用与电磁力相似，可以用一个假设的重玻色子和一对费米子场之间的普适的相互作用来表示。[在此以后，这个中间玻色子就得到了一个确定名称  $w^\pm$ ，当然还是假设的。] 费米以他一贯深刻

<sup>①</sup> 作者注：美国研究生院一般“老师—学生”是指“博士生导师—博士研究生”的关系。在芝加哥大学时，我的博士生导师是费米教授，罗森布鲁斯和杨振宁的博士生导师是泰勒教授。

<sup>②</sup> 作者注：正式物理文献上基本不用“I”，都用“we”，这就是“royal we”。这习惯也常用在科学研究的叙述文章中。本文的“我们”，很多是“royal we”，其实是“我”。为保存原文的风格，“we”和“royal we”都译为“我们”。

洞察力，立刻觉察到这件事的全部重要性。他问道：如果这是一个普适的相互作用，就肯定有理由说明为什么某些费米子对会有这样的相互作用，而某些对则没有。例如：为什么

$$\mu^- \rightarrow e^+ + 2e^- \quad \text{和} \quad p \rightarrow e^+ + 2\nu,$$

同样地，我们也可以问，为什么

$$p \rightarrow e^+ + \gamma ?$$

几天之后，他告诉我们他找到了答案；随后他用不同的数字组，如 +1, -1 和 0，去标识每一个粒子。据我所知，这是首次提出重子数守恒规律和轻子数守恒规律。然而，在那个时候（1948年），我自己对这一构想的反应是完全持否定态度的：确实不需要去解释为什么  $p \rightarrow e^+ + \gamma$ ，因为每个人都知道粒子的特性从来不会通过发射和吸收光子来改变；对于弱相互作用，当时人们只需要说明，仅有三种组合，即  $(\bar{n}p)$ ， $(\bar{e}\nu)$  和  $(\bar{\mu}\nu)$  能够与中间玻色子有相互作用，为什么还要不厌其烦地去引入一长串神秘的数字呢。

某些时候，一项发现的出现只是因为时机成熟了；如果某一个人不能做出这一发现，则另一个人肯定会在大约同一段时间做出。回头来看，我们发现不同过程的弱相互作用耦合常数都相同，正好就是这一类型的发现。类似的观察至少由三个小组，即克拉因(Klein)<sup>[8]</sup>，普比(Puppi)<sup>[9]</sup>，和蒂欧姆诺(Tiomno)及惠勒(Wheeler)<sup>[10]</sup>小组，在大约同一个时间独立地完成，这件事就很清楚了。当然，费米的想法还有更深的意义。但是他的建议未曾发表，这对于物理学来说实属不幸。数年之后，关于这些守恒定律的全部重要性仍未被认识。对于我来说这也许是第一次当一个伟大的物理思想摆在我面前的时候，我却没有认识到，不幸的是，这并不是最后一次。

50年代初，对于 $\beta$ 衰变进行了大量的实验。那时候考诺平斯基-乌伦拜克(Konopinski-Uhlenbeck)相互作用已肯定被排除。在衰变谱中，没有费尔兹(Fierz)干涉项，这说明了相互作用或者是 $V, A$ 或者是 $S, T$ 。这两种可能性随后被一系列 $\beta - \nu$ 角关联实验解决了。在允许跃迁中， $\beta - \nu$ 之间的角分布由下式（忽略费尔兹项）给出

$$[1 + \lambda (P/E)_e \cos \theta] d\cos \theta, \quad (3)$$

其中下标 $e$ 代表电子的动量和能量。对于 $\Delta J=1$ 衰变，

$$\lambda = \begin{cases} + \frac{1}{3}, & \text{对于 } T, \\ - \frac{1}{3}, & \text{对于 } A. \end{cases}$$

在1953年由鲁斯塔德(Rustad)和鲁贝(Ruby)做的 ${}^6\text{He}$ 的 $\beta$ 衰变实验<sup>[11]</sup>给出

$$\lambda = +0.34 \pm 0.09, \quad (4)$$

看起来这毫无疑问地确定了 $\beta$ 衰变相互作用是 $S, T$ ，也许还包含有 $P$ 的某种未知的混合。

有了这一新的结果，关于中间玻色子的理论概念似乎肯定要被排除。如果设想可能有两种具有不同自旋-宇称的中间玻色子，一种为了费米耦合，一种为了伽莫夫-泰勒(Gamow-Teller)耦合，是十分不合适的。然而，甚至对于一个思想开放的理论学家，引入没有导数耦合的张量相互作用也太过份了。即使是用自旋为2的玻色子也不能传递这种作用，因为前者是用非对称张量描述的，而后者则用对称张

量描述。

在同一时期，在其它弱相互作用领域，如  $\mu$  衰变中的电子谱，也有了进展。在这些衰变里，归一化的电子谱  $N(x)$  仅取决于一个参数，名叫米协尔 (Michel) 参数  $\rho$ ：

$$N(x) = 6x^2 \left[ 2(1-x) + \frac{4}{9}(-3+4x)\rho \right], \quad (5)$$

其中 
$$\int_0^1 N(x) dx = 1$$

并且  $x$  与电子动量  $p_e$  和  $\mu$  子质量  $m_\mu$  有关，即

$$x = p_e / \frac{1}{2}m_\mu \quad (6)$$

从图 1 可以看出，不同的  $\rho$  值给出非常不同的电子谱形状。

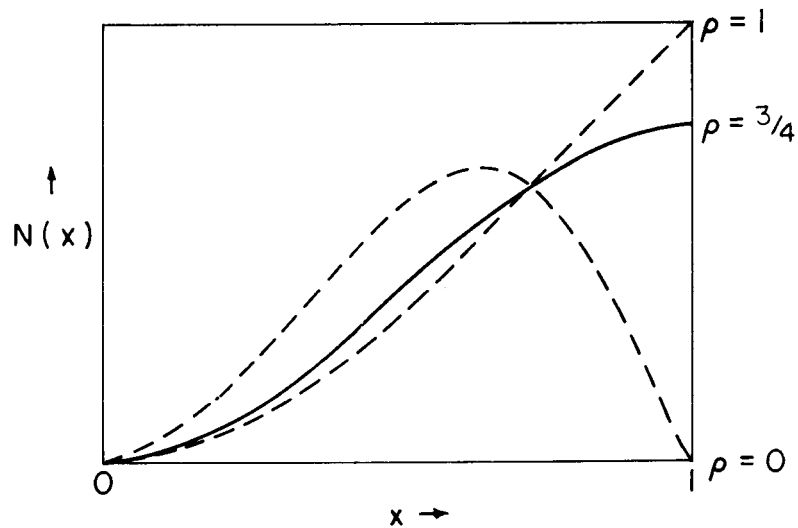


图 1

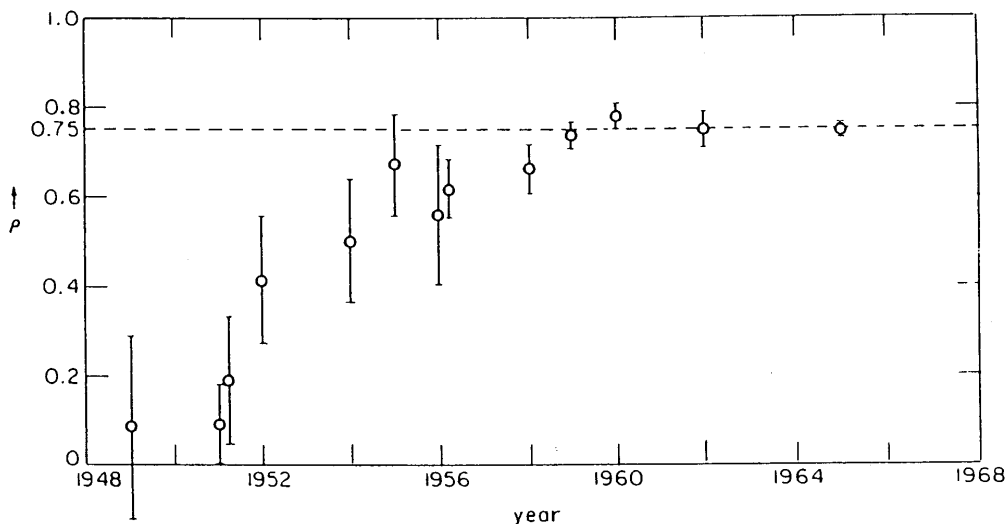


图 2

如图 2 所示，在 1951 年  $\rho$  的实验值是

$$\rho = 0.1 \pm 0.1,$$

作为比较，目前的数值是

$$\rho = 0.752 \pm 0.003 \quad (7)$$

观察图 2 中  $\rho$  值随时间的关系令人感到奇怪，特别需要指出的是，在任何一个特定的时候，每一个实验结果总是在前一个实验结果的误差范围之内。

那时，如果没有出现新发现的奇异粒子间的完全不同的一类弱作用过程，我们对弱作用的了解如此混乱的局面将要延续更长一段时间。

## 二. 过渡阶段

奇异粒子的衰变扩展了弱作用，除了包括已知的纯轻子  $\mu$  衰变过

程，以及奇异数守恒 ( $\Delta S = 0$ ) 的半轻子  $\mu$  俘获和  $\beta$  衰变过程之外；有了两类全新的过程：奇异数不守恒的半轻子及非轻子衰变过程。在这些新过程中，最令人不解的是带电  $\theta$  和  $\tau$  介子。这两个介子是按它们的衰变模式定义的：

$$\theta^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

和  $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$  ，

或  $\tau'^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$  。

$\theta^+$  的自旋宇称是清楚的  $0^+$ ,  $1^-$ ,  $2^+$ , 等等。早在 1953 年，达立兹 (Dalitz) <sup>[12]</sup> 已经指出， $\tau^+$  的自旋宇称可以通过他的达立兹图来进行分析，而在 1954 年，当时所有的数据比较支持其自旋-宇称应为  $0^-$  而不是  $1^-$ 。尽管，已知这两个介子具有相近的质量（在  $\sim 20$  MeV 以内），但在那个时候，对这一结论没有更多的异议。然而，在 1955 年，可以非常准确地测量寿命了。于是，跟统计更好的  $\tau^+$  衰变的达立兹图一起，确实给出了一个非常令人难解的图像。除去赋予自旋非常高的数值  $J \geq 3$  外 [人们不赋予这样大的数值，部分原因是基于直觉，部分原因是它会导致在产生方向和衰变方向之间的角关联，而当时并未观察到]， $\tau^+$  自旋-宇称测量的结果肯定是  $0^-$ ；因此，它肯定与  $0^+$  不是同一个粒子。但是，在实验误差范围内（约百分之几），这两个粒子是具有完全相同的寿命和相近的质量。这就是大家所知的  $\theta - \tau$  之谜。

我的最初反应是，想在常规的理论中设想一个机制去解释这一个谜。和奥里尔 (Orear) <sup>[13]</sup> 一起，在 1955 年夏天，我们提出了一个级联机制：接受已提出的自旋宇称的赋值， $\tau^+$  是  $0^-$ ， $\theta^+$  是  $0^+$ ，但由于相空间的考虑，似乎可以合理地设想  $\theta^+$  具有较  $\tau^+$  短得多的寿



命；如果我们假设  $\tau^+$  比  $\theta^+$  重  $\approx 10$  MeV, 0-0 禁戒跃迁

$$\tau^+ \rightarrow \theta^+ + 2\gamma$$

就可与  $\tau^+$  的  $3\pi$  衰变模式相当，如果这种寿命的测量是（它们本来是）由  $2\pi$  衰变模式的衰减来决定的话，结果“表观的”  $\theta$  寿命就是  $\tau^+$  的寿命。近似的质量简并就被包括到宇称变换对称中。

然而，当阿尔瓦雷兹 (Alvarez) 小组在他们的气泡室里没有找到这种 5 MeV 的  $\gamma$  时，我终于清楚了，那是在 1956 年初，要解决  $\theta - \tau$  之谜必须依赖于更深层次的东西；或许宇称是不守恒的，而  $\theta$  和  $\tau$  实际上是同一个粒子。对于这一简单的想法，直觉的反应是“那么怎么样呢”。除非能够将宇称守恒的可靠性研究同样扩展到其它过程，人们永远不会清楚，在  $\theta - \tau$  衰变中宇称是守恒还是破缺的。因此，就有必要去研究如何能够在其它弱反应中观察到可能的宇称不守恒效应。

那时，宇称算符  $P$  的真实含义还不清楚，至少对我来说是这样。当然，我了解它的数学特征： $P$  应由一个希尔伯特空间中的么正算符来表示，而在  $P$  的作用下，例如对于自旋为  $1/2$  的费米场，我们可以得到

$$P\psi(r, t)P^{-1} = e^{i\varphi} \gamma_4 \psi(-r, t),$$

等等。我假设， $\beta$  衰变可用一个更加普遍的拉氏量来描述，它包括 10 项耦合常数，即通常的 5 项  $C_i$  ( $i=S, P, V, A, T$ ) 和另外 5 项宇称破缺常数  $C_i'$ 。随后我从吴健雄那里借到一本由齐格班 (K. Siegbahn) 编的有关  $\beta$  衰变的权威著作<sup>[14]</sup>，和杨振宁一起系统地计算了所有可能的宇称破缺的效应。我们从允许谱开始，在用

$$C_i^* C_j + C_i'^* C_j' \text{ 代替通常的 } C_i^* C_j \quad (8)$$

之后确切地得到了同样的表达式。随之而来的是禁戒谱，也得到了同样的结果。我们随后又计算了库仑效应， $\beta - \nu$  关联， $\beta - \gamma$  关联和  $\beta - \gamma - \gamma$  关联；虽然其中某些计算非常复杂，但如果我们是用同样的一个简单的替换 (8)，最终所有  $C_i$  和  $C_j'$  之间的干涉项一一被消除，同样的一个老的表达式又出现了，在我们把齐格班的书通读一遍之后，重新用新的相互作用推导了所有的那些老的公式，我们就十分清楚了，在那个时候，甚至连一个能证明在  $\beta$  衰变中宇称是守恒的实验证据都没有。这说明我们是多么愚蠢！应该有一个极为简单的理由，为什么所有那些复杂的干涉项  $C_i^* C_j$  互相一一消除。当我们停止计算而思考时，在一个相当短的时间里，我们就明白了，缺少证据的原因在于这样一个简单的事实，就是没有人做过任何努力去从看来好象左-右对称的安排中专门挑出赝标量进行研究。

此后，理论问题上上了正路。在 1956 年，写出了关于宇称不守恒，二分量理论以及关于  $C$ 、 $P$ 、 $T$  可能的不守恒的普遍问题，包括在中性  $K$  衰变中可能的  $CP$  不守恒等论文<sup>[15]</sup>。在 1957 年 1 月，也导致了由吴健雄，安布勒(Ambler)，海沃斯(Hayward)，霍普斯(Hoppes)和赫德逊(Hudson)所做的有关在  $\beta$  衰变中  $P$  和  $C$  不对称的极为重要的第一个实验<sup>[16]</sup>。随后，很快接着由伽温(Garwin)，莱德曼(Lederman)和温瑞奇(Weinrich)以及由费雷德曼(Friedman)<sup>[17]</sup>和泰勒格第(Telegdi)观察到在  $\pi$  和  $\mu$  衰变中同样存在对称性破坏<sup>[18]</sup>。伽温等人所做的实验是非常巧妙的。

大量的新实验迅速地随之而来，但往往有相互矛盾的结果。关于新的  $\beta$  衰变相互作用应该是什么的问题迫切需要解决。但是在 1957 年夏天，很显然没有哪个理论能与所有当时已存在的实验结果相一

致。其中某些实验肯定是错误的。我私下想，如果有例外的话，老的 ${}^6\text{He}$ 实验一定是正确的。首先，和新的匆忙做完的那些实验不一样，它是富有耐心的大量实验工作的结果；其次，它来自那座优秀的学校——哥伦比亚大学。不过我并没有说出来，而当费曼(Feynman)在那个夏天经过纽约时，当他问我如何看待弱相互作用的实验状况的时候，我建议最好的办法就是去掷硬币来决定。

在那个夏季末，盖尔曼(Gell-Mann)和费曼的论文送到了普平(Pupin)大楼我的办公桌上<sup>[19]</sup>。在页眉上，费曼写道：“我已经掷了硬币，这就是答案”。读过这篇论文之后，我知道我本应借他的硬币的。

我知道，如果 ${}^6\text{He}$ 实验是错误的，我们就可以有V-A相互作用，它在理论上是比较有吸引力的，例如，就有轻子数守恒， $\pi \rightarrow e\bar{\nu}_e$ 衰变率小等等。大约在同时，这同样的推理使马尔夏克(Marshak)和苏达山(Sudarshan)<sup>[20]</sup>和樱井(Sakurai)<sup>[21]</sup>独立地提出了他们有关V-A相互作用的建议。然而，费曼和盖尔曼的补充说明给了我特别深刻的印象，他们认为奇异数守恒的强子弱矢量流 $V_\mu^{wk}$ 和相应的电磁流 $eJ_\mu$ 的同位旋矢量部分可以形成一个同位旋三重态

$$V_\mu^{wk}, (J_\mu)_{I=1}, V_\mu^{wk\dagger}, \quad (9)$$

这非常有吸引力，而且看上去具有很深刻的重要性。从这里，可以得到

$$\frac{\partial V_\mu}{\partial x_\mu} = 0. \quad (10)$$

由于不存在质量为零而具有强相互作用的粒子，(10)意味着，如忽略辐射修正，则

$$(G_V)_{obs} = (G_V)_{bare}, \quad (11)$$

这样就可以比较强子和轻子的弱耦合常数。V-A 相互作用主要是通过戈德哈伯 (Goldhaber), 格劳金斯 (Grodzins) 和森亚 (Sunyar) 的中微子的螺旋度的测量<sup>[22]</sup>来确定。随后吴健雄等人关于  $^{12}\text{B}$  和  $^{12}\text{N}$  的  $\beta^\pm$  衰变中弱磁效应的实验<sup>[23]</sup>以及关于

$$\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$$

寿命的实验<sup>[24]</sup>, 强有力地说明了盖尔曼-费曼关于同位旋三重态假说的正确性。

从 1957 年以后到现在的十年是一个重要的阐明问题的时期。例如, 如图 2 所示, 实验得出的  $\rho$  数值现在与理论吻合得极好。通过盖尔曼, 卡比玻 (Cabibbo) 和其它人的工作, 现在我们有了一个非常简单的相互作用形式, 至少对半轻子过程是这样。在同一个时期, 我们看到了高能中微子实验的创新, 由莱德曼 (Lederman), 史瓦兹 (Schwartz), 斯坦伯格 (Steinberger) 和他们的合作者<sup>[25]</sup>发现了两代中微子

$$\nu_e \neq \nu_\mu \quad (12)$$

除了  $CP$ <sup>[26]</sup>, 人们可以说, 我们终于有了弱相互作用的正确的唯象理论了。

### 三. 现状

与详尽的动力学无关, 人们现在期望下述弱相互作用的普适特性能够适用于所有的弱相互作用:

洛伦兹(Lorentz)不变性

电荷守恒

重子数守恒

轻子数守恒

$CPT$  对称

中微子二分量理论

$\mu - e$  对称

轻子  $U_2 \times U_2$  对称。

除去这些一般特性之外，我们知道费米关于  $V-A$  相互作用的唯象理论至少可适用于低  $q^2$  动量传递。我可以列出几个尚未解决的重要问题：

- 1)  $CP$  破坏的原因；
- 2) 高能量下费米理论不适用（在动量为  $300 \text{ GeV}/c$  时么正限的破坏）；
- 3) 中间玻色子的可能存在。

与此同时，这里还有许多与详尽的动力学以及诸如  $|\Delta I|=1/2$  选择定则，局域手征  $SU_3 \times SU_3$  流代数的正确性等等有关的问题。这些基本而又重要的问题的存在，近期欧洲核子中心(CERN)的交叉贮存环(ISR)的投入使用有可能产生  $W^\pm$  以及国家加速器实验室(NAL)<sup>③</sup> 500 GeV 加速器将产生非常高能的质子、中微子和  $\mu$  子，可以用来去寻找它们的答案，这一切给在这一领域工作的物理学家们展现了一幅令人振奋的前景。

---

<sup>③</sup> 译者注: NAL 即现在的费米实验室(Fermilab, 简称 FNAL)。

## 参考文献:

- 1) W. Pauli: *Proceedings of the Solvay Conference*, Brussels 1933, p.324.
- 2) E. Fermi: *Zeits. Phys.*, **88**, 161 (1934).
- 3) J. L. Lawson and J. M. Cork: *Phys. Rev.*, **57**, 982 (1940).
- 4) C. S. Wu and R. D. Albert: *Phys. Rev.*, **75**, 315 (1949);  
C. S. Wu: *Rev. Mod. Phys.*, **22**, 386 (1950).
- 5) E. Fermi and E. Teller: *Phys. Rev.*, **72**, 399 (1947)
- 6) M. Conversi, E. Pancini and O. Piccioni: *Phys. Rev.*, **68**, 232 (1945).
- 7) T. D. Lee, M. Rosenbluth and C. N. Yang: *Phys. Rev.*, **75**, 905 (1949).
- 8) O. Klein: *Nature*, **161**, 897 (1948).
- 9) G. Puppi: *Nuovo Cimento*: **6**, 194 (1949).
- 10) J. Tiomno and J. A. Wheeler: *Rev. Mod. Phys.*, **21**, 153 (1949).
- 11) B. M. Rustad and S. L. Ruby: *Phys. Rev.*, **89**, 880 (1953).
- 12) R.H. Dalitz: *Phil. Mag.*, **44**, 1068 (1953); *Phys. Rev.*, **94**, 1046 (1954).
- 13) T.D. Lee and J. Orear: *Phys. Rev.*, **100**, 932 (1955).
- 14) K. Siegbahn, editor: *Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy*,  
North Holland (1955).
- 15) T. D. Lee and C. N. Yang: *Phys. Rev.*, **104**, 254 (1956); *Phys. Rev.*, **105**, 1671 (1957); T. D. Lee, R. Oehme and C. N. Yang: *Phys. Rev.*, **106**, 340 (1957).
- 16) C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes and R. P. Hudson: *Phys. Rev.*, **105**, 1413 (1957).
- 17) R.L. Garwin, L. M. Lederman and M. Weinrich: *Phys. Rev.*, **105**, 1415 (1957).
- 18) J. J. Friedman and V. L. Telegdi: *Phys. Rev.*, **105**, 1681 (1957).

- 19) R. Feynman and M. Gell-Mann: *Phys. Rev.*, **109**, 193 (1958).
- 20) R. E. Marshak and E. C. G. Sudarshan: *Padua-Venice International Conference*, 1957; *Phys. Rev.*, **109**, 1860 (1958).
- 21) J. J. Sakurai: *Nuovo Cimento*, **7**, 649 (1958).
- 22) M. Goldhaber, L. Grodzins and A. Sunyar: *Phys. Rev.*, **109**, 1015 (1958).
- 23) Y. K. Lee, L. W. Mo and C. S. Wu: *Phys. Rev. Lett.*, **10**, 253 (1963).
- 24) R. B. Bacastow, T. Elioff, R. R. Larsen, C. E. Wiegand and T. Ypsilantis: *Phys. Rev. Lett.*, **9**, 400 (1962);  
P. DePommier, J. Heintze, C. Rubbia and V. Soergel: *Phys. Lett.*, **5**, 61 (1963);  
A. F. Dunaitsev, V. A. Peterukhin, Yu. D. Prokoshkin and V. I. Rykalin: *Proc. Intern. Conf. Fundamental Aspects of Weak Interactions*, Brookhaven National Laboratory, Upton, L. I., 1963.
- 25) G. Danby, J. M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz and J. Steinberger: *Phys. Rev. Lett.*, **9**, 36 (1962).
- 26) J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch and R. Turlay: *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 138 (1964).

