第20卷 第2期 1964年2月
物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA
Vol. 20, No. 2 Feb., 1964

关于弱相互作用的中間玻色子理論和CP不守恒問題*

高 崇 寿
(北京大学物理系)

近年来，在奇异数改变的奇异粒子衰变中，发現了以下重要的实驗結果：

(1) 非輕子衰变中主要是 $\Delta|\mathbf{I}|=\frac{1}{2}$ 的过程；

(2) 輕子衰变中 $|\Delta\mathbf{I}|=\frac{1}{2}$ 和 $\frac{3}{2}$ 的过程都存在，$\Delta S=\pm\Delta Q$ 的过程都存在；

(3) 对于輕子衰变和非輕子衰变，都沒有发現 $|\Delta S|>1$ 的过程，并且最近实驗上測得 $K_1^0-K_2^0$ 質量差很小. 这些都說明了，在一級弱相互作用的过程中，$|\Delta S|>1$ 的过程是被禁止的.

这些事实中 (1) 和 (2) 直接违反了 Gell-Mann 普适弱相互作用 $V-A$ 理論的預言，并且即使仅保持普适的流-流相互作用的观点，也很难与 (3) 协調起来.

解决这个矛盾的一个可能途径是建立弱相互作用的中間玻色子理論. Takeda 曾指出[1]，如果要建立一个中間玻色子理論能够同时解释上述实驗事实，至少要引进六个中間玻色子. 但是在他所具体提出的理論中，却引进了十二个中間玻色子. 去年李政道提出了一个只引进六个中間玻色子的理論[2]，很好地解释了上述实驗事实. 其后不久，Bell 等人[3]对李政道的理論提出了批評，認为李政道的理論和現有关于 K_{l_3} 衰变的实驗結果矛盾. 他們提出按照李政道的理論要求

$$R_{+2}=\frac{\Gamma_+(L^+)}{\Gamma_2(L^\pm)}=\frac{\Gamma(K^+\to\pi^0+e^++\nu)}{\Gamma(K_2^0\to\pi^-+e^++\nu)+\Gamma(K_2^0\to\pi^++e^-+\tilde{\nu})}=\frac{1}{2},$$

而实驗值則为 $R_{+2}=\frac{9.3\pm2.5}{8.2\pm0.6}=1.1\pm0.3$，并且指出要同时解释上述实驗事实而建立的六个中間玻色子的理論，唯一地只能是李政道的理論，从而得出結論：如果現有关于 K_{l_3} 的实驗結果正确，这一类理論都必須抛弃.

事实上，Bell 等人的批評中所引用的 R_{+2} 値的分子和分母位置放倒了. 按照現有实驗結果[4]，$R_{+2}=\frac{8.2\pm0.6}{9.3\pm2.5}=0.9\pm0.3$. 它和李政道理論預言値的偏离并不如 Bell 等人所提出的那样严重.

进一步我們指出，Bell 等人的批評是在理論始終保持 CP 不变性之下成立的. 但是如所周知，在奇异数改变的輕子衰变中，CP 不变性是缺乏驗証的，許多作者[5]已指出并討論了 CP 不守恆的可能性. 因此即使实驗上确有 $R_{+2}>\frac{1}{2}$，根据这一点来断言这一类

* 1963年4月15日收到.

中間玻色子理論和实驗不符合而必須抛弃尚为时过早.

我們来考虑六个中間玻色子的理論,其中对奇异数改变的衰变允許 CP 不是不变的. 这时 $K \to W + \pi$ 的过程相互作用具有形式(参看文献[3])

$$A(\bar{x}\,\partial_\mu K)\boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{W}^\mu - iB(\bar{x}\boldsymbol{\tau}\,\partial_\mu K) \cdot \boldsymbol{\pi} \times \mathbf{W}^\mu. \tag{1}$$

但其中 A 和 B 不再限定为实数. K 介子到 l_3^+ 衰变的相互作用为

$$\begin{aligned} \bar{\nu} i\gamma_\mu(1+\gamma_5)l[&A\pi^+\partial_\mu K^0 + A^*\pi^+\partial_\mu \bar{K}^0 + \\ &+ B\pi^+\partial_\mu K^0 - B^*\pi^+\partial_\mu\bar{K}^0 + \sqrt{2}\,B\pi^0\partial_\mu K^+]. \end{aligned} \tag{2}$$

由此得相对振幅为

$$\begin{aligned} &K^0 \to \pi^- + l^+ + \nu, && A + B, \\ &\bar{K}^0 \to \pi^- + l^+ + \nu, && A^* - B^*, \\ &K^+ \to \pi^0 + l^+ + \nu, && \sqrt{2}\,B; \end{aligned}$$

衰变宽度为

$$\Gamma_+(L^+) \propto |\sqrt{2}\,B|^2 = 2|B|^2, \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \Gamma_1(L^\pm) \propto |\sqrt{2}(\mathrm{Re}\,A + i\,\mathrm{Im}\,B)|^2 + |\sqrt{2}(\mathrm{Re}\,A - i\,\mathrm{Im}\,B)|^2 &= \\ = 4[(\mathrm{Re}\,A)^2 + (\mathrm{Im}\,B)^2]&, \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \Gamma_2(L^\pm) \propto |\sqrt{2}(\mathrm{Re}\,B + i\,\mathrm{Im}\,A)|^2 + |\sqrt{2}(\mathrm{Re}\,B - i\,\mathrm{Im}\,A)|^2 &= \\ = 4[(\mathrm{Re}\,B)^2 + (\mathrm{Im}\,A)^2]&. \end{aligned} \tag{5}$$

这样我們得到

$$R_{+2} = \frac{1}{2}\,\frac{|B|^2}{(\mathrm{Re}\,B)^2 + (\mathrm{Im}\,A)^2}.$$

这样只要 B 不限定为实数,就有可能和 $R_{+2} > \frac{1}{2}$ 的要求不矛盾. 値得注意的是 $R_{+2} > \frac{1}{2}$ 要求 B, $A + B$ 和 $A - B$ 都必須是复数, 这說明对于 $\Delta s = +\Delta Q$ 的 $K^+ \to \pi^0 + l^+ + \nu$ 和 $K^0 \to \pi^- + l^+ + \nu$ 以及 $\Delta S = -\Delta Q$ 的 $\bar{K}^0 \to \pi^- + l^+ + \nu$ 衰变来說, 都必須要求 CP 不是不变的. 这就給我們利用 K_{l_3} 衰变中关于 CP 守恆的实驗来检驗这个中間玻色子理論以較多的可能性.

对于这个理論的一个可能的检驗是

$$\Gamma_1(L^\pm) + \Gamma_2(L^\pm) - 2\Gamma_+(L^+) \propto |A|^2 > 0 \tag{6}$$

或

$$R_{12} + 1 - 2R_{+2} = \frac{|A|^2}{(\mathrm{Re}\,B)^2 + (\mathrm{Im}\,A)^2} > 0, \tag{7}$$

其中 $R_{12} = \frac{\Gamma_1(L^\pm)}{\Gamma_2(L^\pm)}$. Alexander 等人的实驗得到 $R_{12} = 6.6^{+6.0}_{-4.0}$[4], Crawford 等人的实驗得到 $R_{12} = 3.5^{+3.9}_{-2.7}$[6]. 把这两个値和 $R_{12} = 0.9 \pm 0.3$ 代入, 我們发現,現有的实驗并不和这个理論矛盾.

从 (3), (4) 和 (5) 式可以看出,和实驗相联系的是四个独立系数 $|\mathrm{Re}\,B|$, $|\mathrm{Im}\,B|$, $|\mathrm{Re}\,A|$ 和 $|\mathrm{Im}\,A|$. (3), (4) 和 (5) 式不能完全确定它們, 但可以給出它們之間的联系以及 B 和 A 幅角所受的限制,这一点我們将在附录中給出簡单的图解法.

从附录可以看出, A 是实数和現有的实驗是不矛盾的. 如果我們在理論中假定 A 是

实数，则能够很好地解释 K_{π_2} 衰变中关于 CP 守恆的实驗結果[7]. 事实上，对于 K_{π_2} 衰变来說，代替 K_{l_3} 衰变中的虚过程 $W \to l + \nu$ 应为虚过程 $W \to \pi$. 这相应于在 (1) 中令 $\mathbf{W}^\mu \to \partial_\mu \boldsymbol{\pi}$ 就得 K_{π_2} 的原始相互作用，这时含有 B 的項由于 $\boldsymbol{\pi} \times \boldsymbol{\pi} = 0$ 而不出現. 注意到 $(P_K P_{\pi_1}) = \frac{1}{2}[P_K^2 + P_{\pi_1}^2 - (P_K - P_{\pi_1})^2] = \frac{1}{2}(P_K^2 + P_{\pi_1}^2 - P_{\pi_2}^2) = -\frac{1}{2}m_K^2$, 令 f 为 $W \to \pi$ 与 $W \to l + \nu$ 相互作用常数之比，我們得到 K_{π_2} 衰变的相互作用为

$$-\frac{1}{2} m_K^2 A(\bar{x}K)\boldsymbol{\pi} \cdot \boldsymbol{\pi}. \tag{8}$$

考虑了其他強相互作用的影响，最后得到的等效哈密頓量是把 (8) 式中 $-\frac{1}{2}m_K^2 A$ 換为另一形式因子 A'. 由于在 $K \to 2\pi$ 过程中，所有的洛仑兹空間标量都是常数，A' 亦应是一个常数. 如果 A 是实数，则原始的 $K \to 2\pi$ 过程是 CP 守恆的，而強相互作用过程是 CP 守恆的，因此最后得到的形式因子 A' 也必須严格地是实数，这样得到 $K_2^0 \to \pi^+ + \pi^-$ 的衰变矩陣元严格地为零. 这和文献 [7] 中关于 $K_2^0 \to \pi^+ + \pi^-$ 的实驗检驗很好地符合. 反之，如果 A 不是实数，而經过強相互作用后得到的 A' 却是实数，則将是一种难能的巧合.

考虑到 A 是实数，利用 (3), (4) 和 (5) 并根据現有实驗結果，我們得到

$$\left|\frac{\mathrm{Re}\, B}{B}\right| = \sqrt{\frac{\Gamma_2(L^\pm)}{2\Gamma_+(L^+)}} = \frac{1}{\sqrt{2R_{+2}}} = 0.75 \pm 0.13,$$

$$\left|\frac{A}{B}\right| = \sqrt{\frac{\Gamma_1(L^\pm) + \Gamma_2(L^\pm)}{2\Gamma_+(L^+)} - 1} = \sqrt{\frac{1 + R_{12}}{2R_{+2}} - 1} =$$

$$= 1.8^{+1.4}_{-1.1} \quad 对于 \quad R_{12} = 6.6^{+6.0}_{-4.0}$$

$$= 1.2^{+1.3}_{-1.2} \quad 对于 \quad R_{12} = 3.5^{+3.9}_{-2.7}.$$

最后，我們的討論可以总結如下：如果在奇异数改变的輕子衰变中，可以允許 CP 不是不变的，則修改后的六个中間玻色子的理論不与現有关于 K_{l_3} 衰变几率的实驗結果以及 K_{π_2} 衰变中 CP 守恆的实驗检驗矛盾. 利用实驗結果可以确定 K_{l_3} 衰变中有效作用常数 $\mathrm{Re}\, B$, $\mathrm{Im}\, B$ 和 $A(\mathrm{Im}\, A = 0)$ 的相对比例，但它們的符号則具有不定性. 要完全否定这个理論可以通过驗証 K_{l_3} 衰变过程中的 CP 不变性或精确测定 R_{+2} 和 R_{12} 是否不滿足 (7). 注意到在奇异粒子衰变过程中检驗 CP 不变性的途径已有作者[8]进行了討論，同时考虑到現有关于 R_{+2} 和 R_{12} 的实驗还不够精确，我們有兴趣地期待这两方面的实驗結果.

作者感謝胡宁教授和周光召同志的有益的討論和帮助.

附 录

現在我們給出 (3), (4) 和 (5) 式所給出 B 和 A 幅角变化范围的图解. 我們将只在第一象限中給出，利用結果对两个坐标軸的对称性，可以得出其他諸象限中的結果.

如图 1 在复平面上作三个圓 A, B 和 C, 它們的半径分别为

$$r_A = \sqrt{\Gamma_1(L^\pm) + \Gamma_2(L^\pm) - 2\Gamma_+(L^+)} \propto |A|,$$

$$r_B = \sqrt{2\Gamma_+(L^+)} \propto |B|,$$

$$r_C = \sqrt{\Gamma_2(L^\pm)} \propto |\mathrm{Re}\, B + i\, \mathrm{Im}\, A|.$$

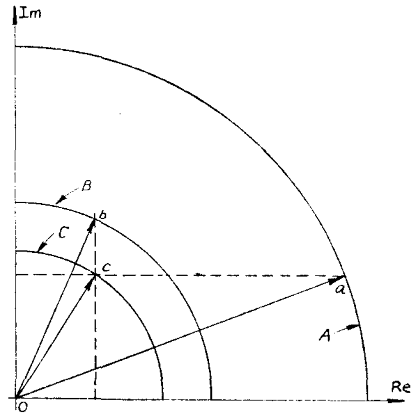

图 1

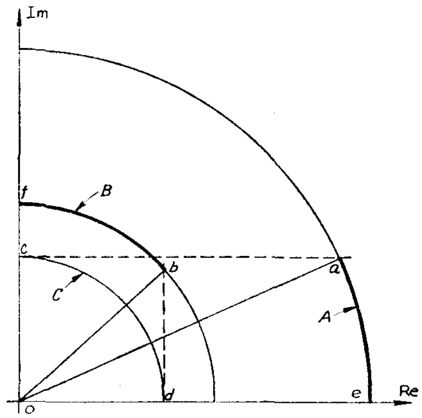

图 2

略去共同的常数因子，A，B 和 $\mathrm{Re}\, B + i\, \mathrm{Im}\, A$ 分别位于这三个圓上，它們之一确定了另两个也就如图确定了．在图 1 上，$oa \propto A$；$ob \propto B$；$oc \propto \mathrm{Re}\, B + i\, \mathrm{Im}\, A$．

从图 2 可以看出，A 的幅角将落于 eoa 范围内，B 的幅角将落于 bof 范围内．

这两图中为确定起見，我們均采用了文献[4]的实驗数据．

参 考 文 献

[1] Takeda, G., *Ann. of Phys.*, **18** (1962), 310.
[2] Lee, T. D. (李政道), *Phys. Rev. Letters*, **9** (1962), 319.
[3] Bell, J. S., Meyer, Ph. and Prentk, J., *Phys. Rev. Letters*, **2** (1962), 349.
[4] Alexander, G., et al., *Phys. Rev. Letters*, **9** (1962), 69.
[5] Lee, T. D. (李政道), *Phys. Rev.*, **106** (1957), 340; Behrends, R. E. and Sirlin, A., *Phys. Rev. Letters*, **8** (1962), 221.
[6] Crawford, F. S., et al., *Phys. Rev. Letters*, **2** (1959), 361.
[7] Аникина, М. Х. и др., *ЖЭТФ*, **42** (1962), 130.
[8] Sachs, R. G. and Treiman, S. B., *Phys. Rev. Letters*, **8** (1962) 137.