第2卷 第2期 高能物理与核物理 Vol. 2, No. 2
1978年3月 PHYSICA ENERGIAE FORTIS ET PHYSICA NUCLEARIS March 1978

自发破坏的类 μ 荷对称重轻子和 $\mu \to e+\gamma$

吴丹迪 李小源
（中国科学院高能物理研究所）

反常的 $e^{\pm}\mu^{\mp}$ 事例[1]和内含 μ 介子产生截面反常[2]暗示存在一个质量为 1.9GeV 左右的带电重轻子．特别是，一个正在进行的 $\mu \to e+\gamma$ 实验[3]很可能给出一个分枝比 $B = \Gamma(\mu \to e\gamma)/\Gamma(\mu \to e\tilde{\nu}\nu) \sim 10^{-9}$ 的肯定信号[4]．重轻子[5]和 $\mu \to e\gamma$ 的可能存在，对弱作用理论研究是巨大的推动，对我们了解包括轻子和强子在内的基本粒子内部结构将给予很深刻的影响．

弱作用电磁作用统一的 Weinberg-Salam 规范理论模型[6]获得了相当的成功．如何使它容纳可能的 $\mu \to e\gamma$ 现象，这是我们讨论的出发点．我们系统地研究了对 Weinberg-Salam 模型以下几种可能的扩充方式：

1. 在拉氏函数中直接引入破坏 μ 轻子数整体规范对称的项[注1]．这样做理论上的可能性很多．

2. 把 μ 轻子数 $U(1)$ 整体规范不变性局部化，使之成为自发破坏的类 μ 荷 (N) 规范不变性．除了 Weinberg-Salam 模型的四个规范场之外增加一个新的规范场 C_μ，规范群扩充为 $SU(2)_L \otimes U(1)_Y \otimes U_N(1)$．这里边又有两种不同的作法：

(A) 除了 ν_e, e, ν_μ, μ 四个老轻子外，不增加新轻子，增加两个类 μ 荷相反的 $(N=\pm1)$ Higgs 标量 $SU(2)$ 二重态．这个做法的唯象结果与 Bjorken-Weinberg[7] 相近，由于 $\mu \to e\gamma$ 过程依赖过多的未知参量，我们放弃这个模型．

(B) 引进重轻子，造成轻子的 $SU(2)$ 左手单态或右手二重态，通过增加一个 $N=1$ 的 $SU(2)$ 单态 Higgs 标量场，把类 μ 荷不同的轻子耦合起来，中性标量场的真空平均值破坏了对称性，给出类 μ 荷破坏的弱流．这种方案揭示了 $\mu \to e\gamma$ 现象和重轻子现象的内在联系，我们将主要讨论这种方式．

如果承认有一个带电重轻子，那么引进重轻子最少的类 μ 荷自发破坏理论是引进两个带电重轻子，一个是 e 型重轻子，一个是 μ 型重轻子，这种引入方式保持了 $\mu \sim e$ 普适性．因此，一个容纳带电重轻子和 $\mu \to e\gamma$ 的最小模型就是：

规范群：$SU(2)_L \otimes U(1)_Y \otimes U_N(1)$

轻子：

$$
\begin{array}{lcc}
 & N & Y \\
L_e \equiv \begin{pmatrix} \nu_e \\ \alpha e + \beta E \end{pmatrix}_L & \begin{array}{c} \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} \\ -1 \end{array} \\
l_e \equiv (\alpha E - \beta e)_L & 0 & -2
\end{array}
$$

本文 1977 月 5 月 12 日收到．

[注1] 在我们的工作完成之后，收到许多国外的预印本[7]，他们的讨论大都属于这一类，其中绝大多数作者以不同方式引进重轻子来实现 μ 轻子数的破坏．

$$L_\mu \equiv \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \alpha\mu + \beta \mathrm{M} \end{pmatrix}_L \qquad 1 \qquad -1$$

$$l_\mu \equiv (\alpha \mathrm{M} - \beta\mu)_L \qquad 1 \qquad -2$$

$$e_R,\ \mathrm{E}_R \qquad 0 \qquad -2$$

$$\mu_R,\ \mathrm{M}_R \qquad 1 \qquad -2$$

Higgs 标量:

$$\phi \equiv \begin{pmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^0 \end{pmatrix} \qquad 0 \qquad +1$$

$$\chi \qquad 1 \qquad 0$$

规范场: $\mathbf{A}_\mu$, B_μ, C_μ

其中，N是类μ荷。 E^- 可以看成 $SLAC$ 的 U 粒子[1,2] $m_{\mathrm{E}} \sim 1.9\mathrm{GeV}$. 根据单叉$\mu$介子内含截面的分析，$\mathrm{M}^-$ 的质量很大，这点后文还要讨论。参量 $\alpha^2+\beta^2=1$.

写下具有 $SU(2)\otimes U(1)\otimes U(1)$ 不变性的拉氏量，它包含了场量所有可能的可重整的耦合.

$$\mathscr{L} = \mathscr{L}_{轻子} + \mathscr{L}_{轻子质量} + \mathscr{L}_{相互作用} + \mathscr{L}_{规范} + \mathscr{L}_{标量}$$

$$\begin{aligned}
\mathscr{L}_{轻子} = {} & \bar{L}_e i\gamma^\rho(\partial_\rho - ig\boldsymbol{\tau}/2\cdot\mathbf{A}_\rho + ig/2B_\rho)L_e + \bar{l}\gamma_\rho(\partial_\rho + ig'B_\rho)l_e \\
& + \bar{e}_R i\gamma^\rho(\partial_\rho + ig'B_\rho)e_R + \bar{\mathrm{E}}_R i\gamma^\rho(\partial_\rho + ig'B_\rho)\mathrm{E}_R + \bar{L}_\mu i\gamma^\rho(\partial_\rho \\
& - ig\boldsymbol{\tau}/2\cdot\mathbf{A}_\rho + i/2g'B_\rho - i/2g''C_\rho)L_\mu + \bar{l}_\mu i\gamma^\rho(\partial_\rho + ig'B_\rho \\
& - ig''/2C_\rho)l_\mu + \bar{\mu}_R i\gamma^\rho(\partial_\rho + ig'B_\rho - ig''/2C_\rho)\mu_R + \bar{\mathrm{M}}_R i\gamma^\rho(\partial_\rho \\
& + ig'B_\rho - i/2g''C_\rho)\mathrm{M}_R \\
\equiv {} & \bar{L}_e\gamma^\rho[g/\sqrt{2}(\tau^+W_\rho^- + \tau^-W_\rho^+) - (g/2\cos\theta + g'/2\sin\theta)\tau_3W_\rho^0]L_e \\
& + \bar{L}_\mu\gamma^\rho[g/\sqrt{2}(\tau^+W_\rho^- + \tau^-W_\rho^+) - (g/2\cos\theta + g'/2\sin\theta)\tau_3W_\rho^0]L_\mu \\
& + (\bar{e},\ \bar{\mathrm{E}},\ \bar{\mu},\ \bar{\mathrm{M}})i\gamma^\rho[\partial_\rho + ig'\sin\theta W_\rho^0 + ieA_\rho]\begin{pmatrix} e \\ \mathrm{E} \\ \mu \\ \mathrm{M} \end{pmatrix} \\
& + (\bar{\nu}_e,\ \bar{\nu}_\mu)i\gamma^\rho\partial_\rho\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} + (\bar{\nu}_\mu,\ \bar{\mu},\ \bar{\mathrm{M}})\gamma^\rho g''/2C_\rho\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \\ \mathrm{M} \end{pmatrix},
\end{aligned}$$

其中 $e = g'\cos\theta = g\sin\theta$，$\theta$ 是 Weinberg 角. 当 $\beta \lesssim 0.2$ 上式对老轻子 ν_e, ν_μ, e, μ 的修正是很小的[注2].

$$\begin{aligned}
\mathscr{L}_{轻子质量} = {} & -m_1(\bar{l}_e e_R + \bar{e}_R l_e) - m_2(\bar{l}_e \mathrm{E}_R + \bar{\mathrm{E}}_R l_e) \\
& - m_3(\bar{l}_\mu\mu_R + \bar{\mu}_R l_\mu) - m_4(\bar{l}_\mu \mathrm{M}_R + \bar{\mathrm{M}}_R l_\mu),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathscr{L}_{相互作用} = {} & -G_e^1[\bar{e}_R\phi^+L_e + \bar{L}_e\phi e_R] - G_e^2[\bar{\mathrm{E}}_R\phi^+L_e + \bar{L}_e\phi\mathrm{E}_R] \\
& - G_\mu^1[\bar{\mu}_R\phi^+L_\mu + \bar{L}_\mu\phi\mu_R] - G_\mu^2[\bar{\mathrm{M}}_R\phi^+L_\mu + \bar{L}_\mu\phi\mathrm{M}_R] \\
& - G_N^1[\bar{l}_\mu\chi e_R + \bar{e}_R\chi^+l_\mu] - G_N^2[\bar{l}_\mu\chi\mathrm{E}_R + \bar{\mathrm{E}}_R\chi^+l_\mu]
\end{aligned}$$

[注2] β 不应太小，否则 E 重轻子的寿命将太长.

$$- G_N^3[\bar{l}_e\chi^+\mu_R + \bar{\mu}_R\chi l_e] - G_N^4[\bar{l}_e\chi^+M_R + \bar{M}_R\chi l_e],$$

通过 Higgs 机制，应当使 $\mathscr{L}_{\text{轻子质量}} + \mathscr{L}_{\text{相互作用}}$ 中的所有轻子的二次式变为 $\bar{\phi}\phi$ 型的质量项，而不出现 $\bar{\phi}\gamma_5\phi$ 型的项．这个要求对我们的模型是很容易满足的，例如取如下的解：

$$m_1\alpha + G_e^1v\beta = -m_2\beta + G_e^2v\alpha = 0,$$
$$m_3\alpha + G_\mu^1v\beta = -m_4\beta + G_\mu^2v\alpha = 0,$$

并令

$$-\beta m_1 + G_e^1v\alpha \equiv M_1, \qquad \alpha m_2 + G_e^2v\beta \equiv M_2,$$
$$-\beta m_3 + G_\mu^1v\alpha \equiv M_3, \qquad \alpha m_4 + G_\mu^2v\beta \equiv M_4,$$
$$G_N^1v'\alpha = G_N^3v'\alpha = -G_N^2v'\beta = -G_N^4v'\beta \equiv \gamma,$$

其中 v, v' 分别是 ϕ 场和 χ 场的真空平均值．假定 γ 是微量，很容易把轻子质量矩阵对角化．记 (e, E, μ, M) 为具对角质量矩阵的粒子，(e^0, E^0, μ^0, M^0) 为原始拉氏量中的粒子，变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} e^0 \\ E^0 \\ \mu^0 \\ M^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{\beta}{\alpha}\frac{\gamma}{M_3} & -\frac{\gamma}{M_4} \\ 0 & 1 & \frac{\gamma}{M_2 - M_3} & \frac{\alpha}{\beta}\frac{\gamma}{M_4 - M_2} \\ -\frac{\beta}{\alpha}\frac{\gamma}{M_3} & -\frac{\gamma}{M_2 - M_3} & 1 & 0 \\ \frac{\gamma}{M_4} & -\frac{\alpha}{\beta}\frac{\gamma}{M_4 - M_2} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e \\ E \\ \mu \\ M \end{pmatrix},$$

或简记为

$$\chi_i^0 = a_{ij}\chi_j \quad (i, j = e, E, \mu, M),$$

式中略去了 γ^2 项及加在其它轻子质量上的电子质量．变换矩阵在忽略 γ^2 项时是正交变换．用具对角质量矩阵的轻子态 χ_j 表示的拉氏量为：

$$\mathscr{L}_{\text{轻子}} + \mathscr{L}_{\text{轻子质量}} + \mathscr{L}_{\text{相互作用}}$$
$$= (\bar{e}, \bar{E}, \bar{\mu}, \bar{M})\,[i\gamma^\rho(\partial_\rho + ieA_\rho + ig'\sin\theta W_\rho^0) - \hat{M}] \begin{pmatrix} e \\ E \\ \mu \\ M \end{pmatrix}$$
$$+ (\bar{\nu}_e, (\alpha a_{1j} + \beta a_{2j})\bar{\chi}_j)\gamma^\rho \left[\frac{g}{\sqrt{2}}(\tau^+W_\rho^- + \tau^-W_\rho^+) - \frac{1}{2}(g\cos\theta\right.$$
$$\left. + g'\sin\theta)\tau_3W_\rho^0\right] \cdot \begin{pmatrix} \nu_e \\ (\alpha a_{1j} + \beta a_{2j})\chi_j \end{pmatrix}_L + (\bar{\nu}_\mu, (\alpha a_{3j}$$
$$+ \beta a_{4j})\bar{\chi}_j) \cdot \gamma^\rho \left[\frac{g}{\sqrt{2}}(\tau^+W_\rho^- + \tau^-W_\rho^+) - \frac{1}{2}(g\cos\theta\right.$$
$$\left. + g'\sin\theta)\tau_3W_\rho^0\right] \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ (\alpha a_{3j} + \beta a_{4j})\chi_j \end{pmatrix}_L + g''(\text{轻子和 } C_\rho \text{ 的耦合项}) + \cdots$$

这里 $\hat{M}$ 代表对角的质量矩阵；

$$\hat{M} = \mathrm{diag}[M_1, M_2, M_3, M_4],$$

此式忽略了 γ^2 量级的修正．容易看出

$$\frac{\alpha^2 g^2}{8M_W^2}=\frac{G_W}{\sqrt{2}}.$$

中微子与中性流的耦合常数为

$$g_{\nu\bar{\nu}}=-\frac{1}{4}\sqrt{g^2+g'^2}.$$

关于新规范场 C_ρ，实验上没有能够直接定出其耦合常数 g'' 大小的事例，我们暂时假定 g'' 很小。

对 $\mu\to e+\gamma$ 过程的主要贡献来自下图[8]：

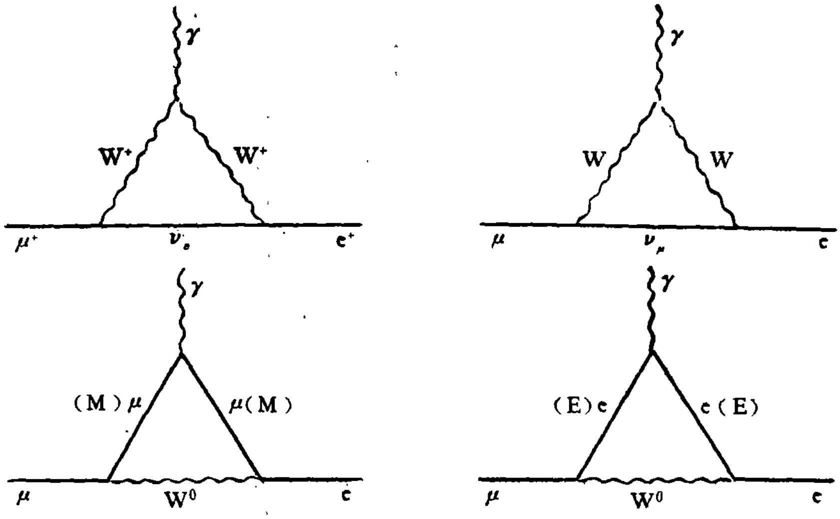

图　1

$$\Gamma(\mu\to e+\gamma)=\frac{G^2}{32\pi^4}\frac{e^2}{4\pi}m_\mu^5\delta^2\left[\frac{-3+4\sin^2\theta_W}{12}\right]^2,$$

其中

$$\delta=\frac{\beta}{\alpha}(a_{23}+a_{41})\approx\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{\gamma}{M_2}+\frac{\gamma}{M_4}\right),$$

$$\delta^2\sim 2.6\times 10^{-6}.$$

据此可估计，当能量小于重轻子的产生阈，我们有

$$\frac{\sigma(\mu+A\to e+A')}{\sigma(\nu+A\to\nu+A')}\sim\delta^2,$$

$$\frac{\sigma(\mu+A\to e+A')}{\sigma(\mu+A\to\nu_\mu+A'')}\sim\frac{\delta^2}{4}\left|\frac{C(I_A,I_A^3;I_{A'}I_{A'}^3;1,0)}{C(I_A,I_A^3;I_{A''},I_{A''}^3;1,1)}\right|^2.$$

这个模型的特点是，重轻子有中性流的衰变道，因此 $\Gamma(E\to e\bar{\nu}\nu)=2.5\Gamma(E\to\mu\bar{\nu}_\mu\nu_e)$. 如果认为 E 重轻子的主要衰变道是 Y. S. Tsai[9] 所算过的那些，在补上相应的中性流的贡献之后，我们得到[注3]

$$\Gamma_t(E^-)\approx 8.2\Gamma(E\to\mu\bar{\nu}_\mu\nu_e),$$

[注3] 假定 $\sin^2\theta_W=0.25$，并假定 *GIM* 分数电荷的强子弱流模型.

$$\Gamma(\bar{E} \to 3\,\text{带电轻子})/\Gamma_t \approx 2.8\%.$$

计及探测效率和相体积的粗略修正,观测截面之比:

$$\frac{\sigma_{\text{观察}}(3\,\text{带电轻子})}{\sigma_{\text{观察}}(e^{\pm}\mu^{\mp})} \sim 1 \sim 2\%,$$

$$\frac{\sigma_{\text{观察}}(4\,\text{带电轻子})}{\sigma_{\text{观察}}(e^{\pm}\mu^{\mp})} \sim 2 \times 10^{-4},$$

$$\sigma_{\text{观察}}(e^+e^-):\sigma_{\text{观察}}(e^{\pm}\mu^{\pm}):\sigma_{\text{观察}}(\mu^+\mu^-) = 3.7:1.8:0.59^{[\text{注}4]},$$

这些结果与实验给出的数值没有严重的矛盾[注5].

最后讨论一下 M^- 重轻子. *SLAC* 单叉内含 μ 反常事例可以用一个重轻子 (1.9GeV) 解释[2],因此 M^- 的产生阈可能在 *SLAC* 能量以上. 但是在 5.8～7.8GeV 能区的多叉 μ 反常,可能暗示 M^- 重轻子的存在. D°(1870) 的发现,说明在 1.9GeV 以上,charm 层子的自由度即可显露,M^- 的衰变道不限于 Y. S. Tsai 计算的几种. M^- 到未知强子(包括弱衰变的强子)的衰变很重要,而这些强子又以多叉的强子道为重要衰变道,这样 M^- 的单叉衰变分枝比就减小了,因此在单叉 μ 反常中不易找到它,而在多叉 μ 反常中可能看到它. 关于 E^- 和 M^- 的衰变性质我们在另外的文章中详细地给出.

参考资料

[1] M. L. Parl, et al., *Phys. Lett.*, **63B**(1976), 466.
[2] G. J. Feldman, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 117.
[3] W. Dey, et al., SIN *Phys. Rep.*, No. 1 (Dec.1976), 9.
[4] E. M. Henley, 在北京一次座谈会上的讲话 (1977 年 1 月).
[5] R. Felst, *Talk Given at the Chicago APS Meeting Feb.* (1977).
[6] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **19**(1967), 1264. A. Salam and J. C. Ward, *Phys. Lett.*, **13**(1964), 168.
[7] T. P. Cheng and Ling-Fong Li, *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 381; F. Wilezek and A. Zee, *Phys. Rev. Lett.*, (1977), 531; J. D. Bjorker and S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 622; B. W. Lee, S. Pakvasa, R. E. Shrock, H. Sugawara, Fermilab-Pub-77/20-THY, (Feb, 1977); H. Fritsch, CALT-68-583, (Jan. 1977); D. Horn and G. G. Ross, CALT-68-585, (Feb. 1977).
[8] R. Jackiw and S. Weinberg, *Phys. Rev.*, **D5**(1972), 2396; K. Fujikawa, B. W. Lee and A. I. Sanda, *Phys. Rev.*, **D6**(1972), 2923; F. Wilezek andA. Lee, *Nucl. Phys.*, **B106**(1976), 461.
[9] Y. S. Tsai, *Phys. Rev.*, **D4**(1971), 2821; G. J. Feldman, in *Proceedings of Summer Institute on Particle Physics*, 1976, Ed. by Zipf, SLAC—198.

SPONTANEOUSLY BROKEN μ-LIKE CHARGE SYMMETRY, HEAVY LEPTONS AND $\mu \to e + \gamma$

WU DAN-DI　　LEE XIAO-YUAN

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

[注4] 在 $E_{cm} = 4.8$GeV 的实验中给出事例数之比为 $(44.3\pm6.9):(19.7\pm5.3):(17.0\pm5.7)$[1]

[注5] D. Horn 和 G. G. Ross 所引 G. J. Feldman 的私人通信中给出 B (3 带电轻子)小于 0.6%[7] 这是一个需要积累大量重轻子事例并很细致地扣除背景才能确定的分支比.