

# 带电重轻子的非对角产生和非对角中性流

伍经元 李小源 吴丹迪

(中国科学院高能物理研究所)

中性流的性质,特别是有无非对角的中性流(以下简记为 NDNC),对于正确选择弱相互作用和电磁相互作用的统一模型具有关键性的意义. 在实验上,只测量了  $s \leftrightarrow d$ 、 $\mu \leftrightarrow e$  的中性流,结果似乎是否定的<sup>[1]</sup>. 对于熵数改变的中性流,因为有 Cabibbo 角引起的压低,实验是困难的,因而结论并不十分清楚. 可是,非常有兴趣的是,在 Serpukhov 的泡室实验中<sup>[2]</sup>,观察到一个可能的  $\nu_\mu$  感生的中性重轻子事例,这暗示 NDNC 有可能存在<sup>[3]</sup>. 并且,如有更重的新夸克和新轻子,与之伴随出现 NDNC 也并不与现有的实验矛盾<sup>[3]</sup>. 因而,建议新的灵敏实验来进一步研究非对角中性流的信号是很有意义的.

重轻子  $\tau$  的发现<sup>[4]</sup>,推动实验上去寻找更多的新轻子. 探测带电重轻子通常是利用如下的反应道

$$e^+ + e^- \rightarrow L^+ + L^- \rightarrow e^\mp + \mu^\pm + \text{探测不到的中性成份}, \quad (1)$$

可是,由于在这个反应中含有探测不到的中性成份,实验分析十分复杂,重轻子存在的证据也是间接的,缺乏重轻子产生的清晰信号<sup>[4]</sup>.

在这篇文章中,我们建议研究高能正负电子对撞中带电轻子的非对角产生,这种反应道的发现,将给出非对角中性流和质量带电轻子的确定信号. 具体的过程是

$$e^+ + e^- \rightarrow l^\pm + L^\mp, \quad (2)$$

这里,我们假定存在和轻子  $l^-(e^-, \mu^-, \tau^-, \dots)$  其中微子的正常(Ortho-)重轻子  $L^-(E^-, M^-, T^-, \dots)$ . 这个反应道有鲜明的特征:

(1) 由于反应的两体特征,使得在内含的  $l$  轻子能谱上出现和  $L$  产生相应的峰,从而给出带电重轻子产生的明显信号.

(2) 在通常的弱电统一理论中,电磁流始终是对角的(有电磁激发轻子的情况例外),带电轻子的非对角产生只能起源于非对角的弱中性流.

(3) 轻子的非对角产生比成对电磁产生重轻子有较低的阈值,因而在正在建造的高能  $e^+e^-$  储存环上,可以观察质量高于束流能量的带电重轻子.

我们将首先讨论过程(2)的截面,然后讨论与实验方法有关的问题. 具体说,我们将讨论  $\mu^\pm$  和  $M^\mp$  的非对角产生.

为了确定起见,我们将借助如下模型

$$\left( \begin{array}{c} (1 - \epsilon_\mu^2)\nu_\mu + \epsilon_\mu M^0 \\ \cos \beta_\mu \mu^- + \sin \beta_\mu M^- \end{array} \right)_L, \quad \left( \begin{array}{c} M^0 \\ \cos \gamma_\mu \mu^- + \sin \gamma_\mu M^- \end{array} \right)_R, \quad (3)$$

这里  $\epsilon_\mu \ll 1$ , 由于普适性的原因,对  $\cos \beta_\mu$  有一定的限制<sup>[3]</sup>. 我们的结果对有 NDNC 的

本文1978年3月17日收到.

其它模型,只需要做小的修改即可适用。

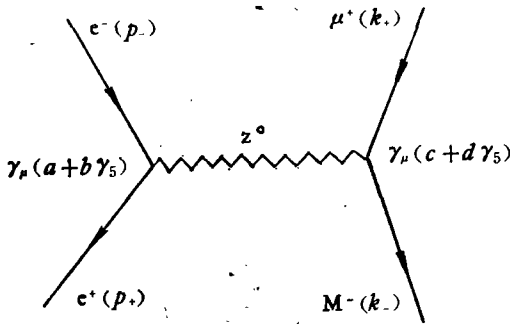


图 1

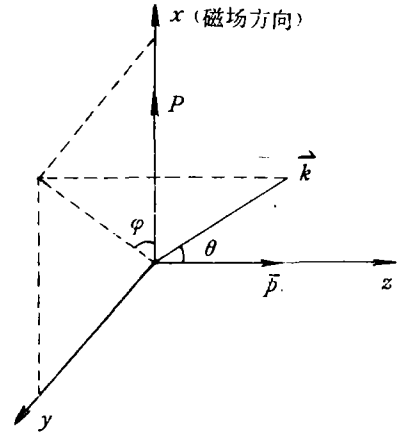


图 2

过程(2)的截面为

$$\begin{aligned} \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu M) &\equiv \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^-M^+) + \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+M^-) \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{(s - m_z^2)^2} \cdot \frac{k}{E} \\ &\quad \cdot [(a^2 + b^2)(c^2 + d^2)(k^2/3 + E_\mu E_M) \\ &\quad + (a^2 + b^2)(c^2 - d^2)mm_-], \end{aligned} \tag{4}$$

其中(见图 1, 2)

$$\begin{aligned} p_- &= (-\mathbf{p}, E), p_+ = (\mathbf{p}, E), s = -q^2, E = \frac{\sqrt{s}}{2}, \\ k_- &= (-\mathbf{k}, E_M), k_+ = (\mathbf{k}, E_\mu), k_-^2 = -m^2, k_+^2 = -m^2, |\mathbf{k}| = k, \end{aligned} \tag{5}$$

在模型(3)中,中性流强度为

$$\begin{cases} a = 1/4 G(-\cos^2\beta_e - \cos^2\gamma_e + 4\sin^2\theta_w), \\ b = 1/4 G(\cos^2\beta_e - \cos^2\gamma_e), \\ c = 1/4 G(\cos\beta_\mu \sin\beta_\mu + \cos\gamma_\mu \sin\gamma_\mu), \\ d = 1/4 G(\cos\gamma_\mu \sin\gamma_\mu - \cos\beta_\mu \sin\beta_\mu), \end{cases} \tag{6}$$

而  $G = \sqrt{g^2 + g'^2}$ ,  $g, g'$  是  $SU(2) \otimes U(1)$  模型中之耦合常数, 它和 Fermi 弱作用常数  $G_F$  的关系是  $G_F/\sqrt{2} = G^2/8m_z^2 \cos\beta_e \cos\beta_\mu$ . 略去轻子质量, (4)式简化为

$$\begin{aligned} \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu M) &= \frac{G_F^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{(s/m_z^2 - 1)^2} \cdot \frac{k}{E} \cdot (E_M E_\mu + k^2/3) \cdot \left(\frac{\cos\beta_e}{\cos\beta_\mu}\right)^2 \\ &\quad [(-\cos^2\beta_e + 2\sin^2\theta_w)^2 + (-\cos^2\gamma_e + 2\sin^2\theta_w)^2] [\cos^2\beta_\mu \sin^2\beta_\mu + \cos^2\gamma_\mu \sin^2\gamma_\mu], \end{aligned} \tag{7}$$

对典型的情况,我们取  $\sin^2\theta_w \sim 0.38$ ,  $m_\pi = 70\text{GeV}$ ,  $s = (30\text{GeV})^2$ ,  $m_- = 10\text{GeV}$ , 我们得到

$$\sigma(ee \rightarrow \mu M) < 1.9 \times 10^{-3}\text{nb}, \tag{8}$$

(8)式右方为相同能量下  $ee \rightarrow \gamma \rightarrow \mu\mu$  截面的 2%。显然, 当对撞机的能量接近中性矢量介子的质量  $m_\pi$  时, 这个反应最有利。

与  $M^-$  同时产生的  $\mu$  介子的角分布为(图 2):

$$\frac{d\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+M^-)}{d\Omega_\mu} = \frac{1}{16\pi^2} \cdot \frac{k}{E} \cdot \frac{1}{(s - m_z^2)^2} \{ (c^2 + d^2)[a^2(1 - p^2) + b^2(1 + p^2)] \cdot (k^2 \cos\theta + E_\mu E_M) + (a^2 - b^2)(c^2 + d^2)p^2(k^2 + E_\mu E_M - 2k^2 \sin^2\theta \cos^2\varphi) + (a^2 + b^2)(c^2 - d^2)mm_- + 8abcdEk \cos\theta \}, \quad (9)$$

其中  $p$  是正电子在约束磁场方向的极化率,

$$\cos\theta = \mathbf{p} \cdot \mathbf{k} / Ek, \quad \cos\varphi = k_x/k.$$

实验上观察反应道(2)的最方便的方法之一就是研究内含的  $\mu^\pm$  介子能谱, 捕捉和  $M^\mp$  产生相应的峰, 由  $\mu$  能谱上的峰的位置, 可以直接确定重轻子的不变质量, 给出重轻子产生的清楚信号. 这个方法的明显优点是实验方法简单, 而且有较高的事例率.

在表 1 中, 我们给出了在 PEP 或 PETRA 能量下,  $\sqrt{s} = 30\text{GeV}$ , 当  $M^-$  质量从  $4\text{GeV}$  到  $25\text{GeV}$  之间变化时, 相应的轻子  $\mu$  的动量数值,  $k = E - m_-^2/4E$ , 其中已忽略了  $\mu$  介子的质量.

表 1 相应重轻子  $M^\pm$  产生的  $\mu^\mp$  的动量谱 ( $\sqrt{s} = 30\text{GeV}$ )

$m_-(\text{GeV})$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	25
$k(\text{GeV})$	14.7	14.4	14.0	13.3	12.6	11.7	10.7	9.6	8.4	6.8	5.4	4.5

过程的主要背景来源于 QED, 包括  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $\mu^+\mu^-\gamma$ ,  $\mu^+\mu^-e^+e^-$  等等, 在表 1 的能区范围, 这些背景恰好是小而平滑的<sup>[5]</sup>, 如果再采取其它减少 QED 背景的办法\*, 例如加上共面角小于  $20^\circ$  的反号电子的反符合和共面角小于  $10^\circ$  的反号  $\mu$  介子的反符合, 扣除 QED 就很有保证了. 次强的背景是重轻子或强子的成对产生, 如果这些粒子有可观的  $\mu$  介子的衰变道的话. 关于这些次级  $\mu$  介子的能谱, 典型的讨论<sup>[6]</sup>指出, 通过  $\gamma$  产生  $\tau^+\tau^-$  出来的  $\mu$  介子多在低能区, 大动量区变化平滑, 没有结构. 还有其它可能的背景, 例如来自中性重轻子的产生和衰变<sup>[7]</sup>和图 1 中  $M^-$  的衰变, 其  $\mu$  介子谱也没有峰. 这后两种背景, 在表 1 能量范围的某一小间隔内的事例将是很小的.

背景的分析表明, 内含  $\mu$  介子能谱的高能端主要是  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  及其辐射修正, 低能端来自粲介子, 重轻子的衰变以及双光子过程, 离开这两个区域, 能谱是平滑和无结构的. 因而, 相应这个区域的重轻子产生, 实验相对是灵敏的, 而当  $m_- > 25\text{GeV}$  时, 截面(6)太小, 而  $m_-$  太小时, 受到仪器动量分辨率的限制. 在表 2 中, 我们给出在  $\sqrt{s} = 30\text{GeV}$  时, 和实验的动量分辨率  $\delta k/k$  相应, 实验灵敏的重轻子的最小质量.

表 2 实验灵敏的重轻子的最小质量 ( $\sqrt{s} = 30\text{GeV}$ )

动量分辨率 $\delta k/k$	10%	5%	1%
$(m_-)_{\text{最小}} (\text{GeV})$	9.5	6.7	3.0

我们想强调指出一点, 当改变质心能量时,  $\mu$  介子能谱中相应于  $M^-$  产生的峰和由于背景所造成的可能的鼓包行为很不一样, 抓住这个特点, 就可用作信号还是背景的鉴别. 总之, 提高  $\mu$  谱仪的分辨本领, 将减少所有的背景, 而突出所需要的事例. 例如当谱仪能

\* 关于这些办法, 最近有详细的讨论<sup>[1]</sup>.

分辨 0.15GeV 的能量时,后两种背景截面将小于 2nb.

当然,我们在这儿给出的是非对角产生的截面上限,由于  $\mu$ -M 混合角小或者由于  $e^+e^-$  与  $\mu^+M^-$  不与同一个中性中间玻色子耦合等等原因,实际截面可能要低一些或低很多.

如果有足够的  $M^-$  事例,我们将能够用简单直接的方法对重轻子  $M^-$  的性质进行研究.

(1) 如果  $M^-$  是  $\mu$  介子的电磁激发态,记为  $\mu^{*-}$ ,  $\mu^{*-}$  的主要衰变道是  $\mu^{*-} \rightarrow \mu\gamma$ ,  $\Gamma(\mu^{*-} \rightarrow \mu\gamma)/\Gamma(\mu^{*-} \rightarrow \mu\nu\bar{\nu}) \gg 6/\pi \alpha^*$ , 这样的重轻子还可以有如下产生方式:  $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^{*-}$ . 如有这种重轻子,我们将会在所选出的事例中看到许多硬  $\gamma$  事例.

(2) 中性重轻子  $N^0$  的质量与  $m_-$  的相对大小对  $M^-$  的衰变性质有很大影响,我们引入两个量以资区别,一个是多叉衰变分支比  $R_{mp}$ , 另一个是有  $\mu$  介子的衰变道的比例  $R_\mu$ . 在表 3 至表 5 中,我们就三种情况给出了  $M^-$  的各衰变道.所有的计算都是标准的<sup>[8]</sup>.假定没有混合角时的中性流强度总是相应带电流的 1/2. 注意到由于有中性流衰变道,  $M^- \rightarrow \mu^-\nu_\mu\bar{\nu}_\mu$  及  $M^- \rightarrow \mu^-\mu^+\mu^-$  各有两个互相干涉的图. 为了简化,假定没有比  $M^-$  更轻的带电重轻子,没有比  $M^0$  更轻的中性重轻子. 当计算半强子衰变道时,认为高质量赝标介子的衰变常数  $f_p$  和  $\pi$  介子的衰变常数  $f_\pi$  近似相等,同样对矢量介子有  $f_v$  近似等于  $f_\rho$  等,都与赝标,矢量介子的质量关系不大,因此,即使考虑衰变到更重的  $0^-, 1^-, 1^+$  强子的可能性,很重的重轻子到单个强子的衰变分支比仍依重轻子质量平方的倒数下降. 到强子连续态的衰变. 计算时取  $R$  在  $\sqrt{s} > 2\text{GeV}$  时的平均值为 4\*\*.

表 3  $M^-$  各衰变道 ( $m_- = 10\text{GeV}, m_0 > m_-, V - A$ )

初 级 衰 变	次 级 衰 变	分 支 比
$\nu_\mu e^- \bar{\nu}_e$		1
$\nu_\mu \mu^- \bar{\nu}_\mu + \nu_e \mu^- \bar{\nu}_e + \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\tau$		2.75
$\nu_\mu \tau^- \bar{\nu}_\tau$		1
	$\tau^- \rightarrow \nu_\tau e^- \bar{\nu}_e$	1
	$\nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu$	1
	$\nu_\tau \pi^-$	0.55*
	$\nu_\tau \rho^-$	1.20
	$\nu_\tau A_1^-$	0.45
	$\nu_\tau +$ 强子连续态	0.95
$\nu_\mu h^- (h^- = \pi, \rho, A_1, \dots)$		$\leq 0.09$
$\nu_\mu +$ 强子连续态		4.32
$\mu^- e^+ e^-$		0.25
$\mu^- \mu^+ \mu^-$		0.25
$\mu^- \tau^+ \tau^-$		0.13
$\mu^- h^0 (h^0 = \pi, \rho, \eta, \eta', \dots)$		$\leq 0.02$
$\mu^- +$ 强子连续态		1.08
总 计		10.90

$R_{mp} = 60\%$

$R_\mu < 42\%$

\* 这是理论值,实验尚未看到  $\tau \rightarrow \nu_\tau \pi$ .

\*  $6/\pi \alpha$  是当通过中间玻色子的单圈图导致  $\mu^{*-} \rightarrow \mu\gamma$  过程时的比值.

\*\*  $R$  的数值,由于测量时定义可能不同, SLAC 给出在  $4\text{GeV} < \sqrt{s} < 7\text{GeV}$  时是 5.5<sup>[4]</sup>, DESY 给出  $R = 4.8$ <sup>[9]</sup>, 减去一个重轻子的贡献,强子的贡献是 3.8~4.5 之间.

值得指出,由于有 NDNC, 某些衰变终态完全是带电粒子, 这样的衰变道也可以被用来做  $M^-$  质量的直接测定。

上述方法在作很小修改后可移用于  $E^-$  和  $E^0$  的讨论, 不过探测内含电子时, QED 背景的扣除必须更加细致。

表4  $M^-$  各衰变道 ( $m_- = 10\text{GeV}$   $m_0 > m_-$ ,  $V + A$ )

初 级 衰 变	分 支 比
$\mu^- \nu_e \bar{\nu}_e$	1
$\mu^- \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$	1
$\mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\tau$	1
$\mu^- e^+ e^-$	1
$\mu^- \mu^+ \mu^-$	2
$\mu^- \tau^+ \tau^-$	0.5
$\mu^- h^0$	$\leq 0.09$
$\mu^- +$ 强子连续态	4.3
总 计	10.9
$R_{mp} < 73\%$	$R_\mu = 1$

表5  $M^-$  各衰变道 ( $m_- = 10\text{GeV}$   $m_0 = 8\text{GeV}$   $V + A$ )

初 级 衰 变	次 级 衰 变	分 支 比
$M^0 e^- \bar{\nu}_e$		1
$M^0 \mu^- \bar{\nu}_\mu$		1
$M^0 h^-$		$< 0.1$
$M^0 +$ 强子连续态		0.45
	$M^0 \rightarrow \mu^- e^+ \nu$	1
	$\mu^- \mu^+ \nu$	1
	$\mu^- \tau^+ \nu$	0.5
	$\mu^- h^+$	$< 0.2$
	$\mu^- +$ 强子连续态	3.7
$\mu^- + X^0 (X^0 \text{ 任意})$		$2.7 \cos^2 r$
总 计		$2.6 + 2.7 \cos^2 r$
$R_{mp} > 86\%$		$R_\mu = 1$

### 参 考 资 料

- [1] J. Blietschau et al., *Phys. Lett.*, **71B** (1977), 231;  
P. Depommier et al., *Phys. Rev. Lett.*, **39** (1977), 113;  
W. Dey et al., *SIN Phys. Rep.*, **2** (1977), 11;  
H. P. Povel et al., *Phys. Lett.*, **72B** (1977), 183.
- [2] D. S. Baranov et al., *Phys. Lett.*, **70B** (1977), 269.
- [3] 吴丹迪、伍经元、李小源, 高能物理与核物理, **2** (1978), 42.
- [4] M. L. Perl, SLAC-PUB-2022 (1977).
- [5] R. Bhathacharya, J. Smith, G. Grammer, Jr., *Phys. Rev.*, **D15** (1977), 3267; J. Burmester et al., DESY 77/24 (1977); F. Gutbrod and Z. J. Rek, DESY 77/45 (1977).
- [6] For example, T. Hagiwara, S-Y Pi and A. I. Sanda, *Ann. Phys. (N. Y.)*, **106** (1977), 134.
- [7] J. D. Bjorken and C. H. Llewellyn-Smith, *Phys. Rev.*, **D7** (1973), 887; F. Bletzacker and

- H. T. Nieh, *Phys. Rev.*, **D16** (1977), 2115.  
[8] Y. S. Tsai, *Phys. Rev.*, **D4** (1971), 2821.  
[9] G. Knies, DESY 77/74 (1977).

## THE PRODUCTION OF CHARGED HEAVY LEPTONS BY NON-DIAGONAL NEUTRAL CURRENTS

WU JING-YUAN    LI XIAO-YUAN    WU DAN-DI  
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)