

L3 实验单 W 产生截面及反常耦合常数的测量*

杨 民 陈国明 杨海军
熊兆华 吕雨生 陈和生
(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 使用 1996 和 1997 年在 L3 探测器上获得的数据,对单 W 粒子产生过程 $e^+e^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e W^+$ 和 $e^+e^- \rightarrow e^+ \nu_e W^-$ 的反应截面做出了测量,并根据测量结果给出 WW γ 三玻色子耦合的反常耦合常数为: $-0.65 < \Delta\kappa_\gamma < 0.82$, $-1.37 < \lambda_\gamma < 0.92$. 实验结果在误差范围内是与标准模型的理论值一致的,没有发现反常耦合常数存在的迹象.

关键词 单 W 粒子产生截面 规范玻色子 耦合常数 标准模型

1 引言

标准模型从建立至今通过了各种严格的检验.目前正在运行的 LEP2 则提供了一种新的严格检验的机会,这就是三规范玻色子耦合的测量.对于三规范玻色子耦合一般地说有 5 个量来描述实际值与标准模型值的偏差,它们是 $\Delta g_1^2, \Delta k_2, \Delta k_\gamma, \lambda_2$ 和 λ_γ . 任何测量到的非零值都意味着超出标准模型的物理现象.在 LEP2 的运行能区存在 W 对产生和单 W 产生两种过程,单 W 产生过程又分为 s 道和 t 道.其中 t 道单 W 产生过程

$$e^+e^- \rightarrow e^+\nu_e W^- \quad (1)$$

可以用作检验 WW γ 顶点.这个过程的截面计算见文献[1],WW γ 耦合只与 $\Delta\kappa_\gamma$ 和 λ_γ 有关.涉及的参数少是这个过程的优越性,但在 LEP2 能区,这一过程的截面小(约 0.5pb),则是其困难之处.好在这个过程对 $\Delta\kappa_\gamma$ 和 λ_γ 很敏感,且有明确的信号.总的来说这一过程的末态有一个正或负电子从束流管逃逸,且中微子也不能被测到,因此有大的能能量丢失. W 的衰变分为轻子道和强子道.在轻子道的情形 $W^- \rightarrow l^- \bar{\nu}_l$, ($l=e, \mu, \tau$), 其可测末态只是一个带电轻子,而在强子道 $W^- \rightarrow q\bar{q}'$, 其末态是两个强子喷注,且两喷注的不变质量在 m_w 附近.

本文所用的数据是 L3 探测器^[2]在 1996 和 1997 年所获取. L3 实验是正负电子对撞机 LEP 上的一个实验,位于西欧核子中心(CERN),L3 探测器由内向外由硅微条探测器,

1999-12-01 收稿,2000-03-17 收修改稿

* 国家自然科学基金资助(19675047,19555003)

时间扩展径迹室, BGO 晶体组成的电磁量能器, 由贫化铀板和多丝正比室夹层而成的强子量能器和 μ 子漂移室构成. 除硅微条和时间扩展室外, 其余子探测器都分桶部和端盖两部分. 由晶体组成的电磁量能器和放在磁场里的大型精密 μ 子漂移室使得 L3 探测器能够精确测量光子、电子和 μ 子. 探测器的具体性能请见文献[2]. 这次所用的数据, 其正负电子对撞的质心能量分别为 161, 172 和 182.7 GeV, 各能量点的积分亮度分别为 10.9 pb^{-1} , 10.2 pb^{-1} , 55.47 pb^{-1} .

2 信号的定义

为了研究信号的接收效率, 使用名为 EXCALIBUR^[3] 的蒙特卡罗事例产生器产生事例. 该产生器产生所有末态包含 4 个费米子的事例, 为此需要对信号进行定义. 文中信号定义为满足下列相空间条件的所有 $e^+e^- \rightarrow e^+ \nu_e f f'$ 事例

$$|\cos\theta_{e^+}| > 0.997$$

$$E_f > 20 \text{ GeV}, E_{f'} > 20 \text{ GeV},$$

其中 θ_{e^+} 为末态 e^+ 的极角, 而 $E_f, E_{f'}$ 则为末态费米子的能量. 在如此定义的相空间中, 93% 为 $e^+e^- \rightarrow e^+ \nu_e W^-$, $W^- \rightarrow f f'$, 即所说的单 W 事例, 另有 7% 来自非共振末态. 所述的纯度, 对于不同的质心能量变化很小.

为了研究本底, 蒙特卡罗产生器 KORALZ^[4] 用以产生 $e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- (\gamma), \tau^+ \tau^- (\gamma)$ 事例, KORALW^[5] 用以产生 $e^+e^- \rightarrow W^+ W^- \rightarrow f f' f' f'$ 事例, BHAGENE3^[6] 和 TEEGG^[7] 用以产生 $e^+e^- \rightarrow e^+ e^- (\gamma)$ 事例, PYTHIA^[8] 用以产生 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} (\gamma)$ 事例, ZZ 事例, PHOJET^[9] 用以产生双光子事例. 所有信号和本底事例都用 GEANT3^[10] 程序包对粒子和 L3 探测器的相互作用进行模拟, 强相互作用部分使用了 GHEISHA 程序^[11].

3 强子道的选择

强子道即 $e^+e^- \rightarrow e^+ \nu_e W^-$, $W^- \rightarrow q\bar{q}'$ 或其电荷共轭过程. 其末态特征是两个喷注, 其不变质量在 W 质量附近. 首先要求事例中有 5 根以上好径迹, 量能器中最小可分辨簇射团个数大于 14, 并且事例中没有 μ 子, 能量较高 (如几个 GeV 以上) 的电子和孤立的高能光子. 以上条件排除了所有低多重数事例, 剩下的高多重数事例中, $e^+e^- \rightarrow W^+ W^-$ 是主要本底, 其次有 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} (\gamma), e^+e^- \rightarrow e^+ e^- q\bar{q}$. 为了排除这些本底, 要求测到的总能量大于 50 GeV, 小于 130 GeV (对于 183 GeV 大于 60 GeV, 小于 140 GeV), 纵向能量不平衡与总能量之比小于 0.7, 亮度监测器上沉积的能量小于 50 GeV, 并且要求动量丢失的方向不能在小角度区, 具体的动量丢失的 θ 角大于 8° 小于 172° . 这些简单 cut 基本上排除了双光子本底 (即 $e^+e^- \rightarrow e^+ e^- q\bar{q}$ 过程), 但来自 $W^+ W^-$ 和 $q\bar{q} (\gamma)$ 的本底仍很高 (约是信号的 50 倍), 为此对每个对撞能量构造一个神经网络来区分 $W^+ W^-$ 和 $e^+ \nu_e W^-$, 构造另一神经网络来区分 $q\bar{q} (\gamma)$ 和 $e^+ \nu_e W^-$, 这样共有 6 个网络, 神经网络的算法见文献[11]. 神经网络的输入量为事例的总能量、横向能量不平衡、纵向能量不平衡、电磁量能器能量沉积、动量丢

失的方向、各喷注的能量、喷注间的不变质量等,不同的网络输入量稍有不同,6 个网络输入量的个数请见表 1. 图 1—3 分别为 3 个对撞能量的神经网络输出值. 图 1 为 183GeV 能区神经网络的输出值,(a)用以排除 W^+W^- , (b) 用以排除 $q\bar{q}(\gamma)$; 图 2 为 172GeV 能区神经网络的输出值,(a)用以排除 W^+W^- , (b)用以排除 $q\bar{q}(\gamma)$; 图 3 为 161GeV 能区神经网络的输出值,(a)用以排除 W^+W^- , (b)用以排除 $q\bar{q}(\gamma)$.

根据网络的输出值,通过优化确定的信号选择标准见表 2,也即如果一事例其网络输出值大于该标准即为信号.

通过简单 cut 和神经网络的选择,强子道总体的选择效率及本底情况见表 3. 表 3 中的预期事例数是指在相应的质心能及积分亮度下,预期的单 W 粒子产生的强子衰变道的全部事例数;信号和本底则分别是在经过事例选择后由蒙特卡罗事例估算的选出的单 W 事例(信号)和其他事例(本底);选出事例数是指经过事例选择后得到的实际数据,其不变质量谱见图 4.

表 1

E_{cm}/GeV	183	172	161
输入量(排除 W^+W^-)	16	16	14
输入量(排除 $q\bar{q}(\gamma)$)	12	12	12

表 2

E_{cm}/GeV	183	172	161
输出值(排除 W^+W^-)	0.6	0.6	0.7
输出值(排除 $q\bar{q}(\gamma)$)	0.9	0.8	0.9

表 3

E_{cm}/GeV	预期事例数($W \rightarrow q\bar{q}$)	信号	本底	选出事例数(数据)	选择效率(%)
161	1.8	1.0	2.7	4	55.6
172	2.5	1.4	3.9	5	56.0
183	18.3	9.2	15.0	26	50.3

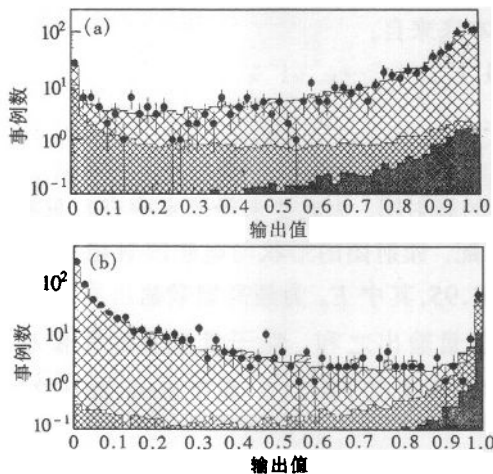


图 1 183GeV 能区神经网络输出值
(a) 网络 1; (b) 网络 2.

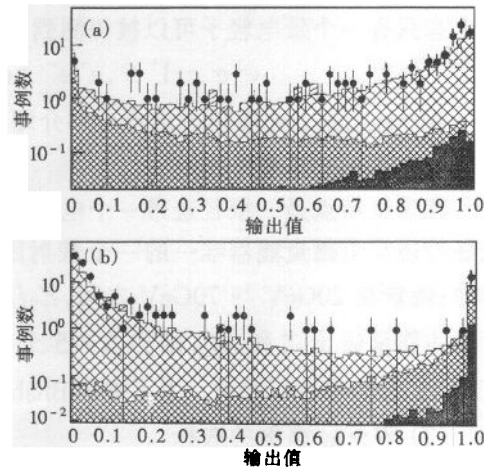


图 2 172GeV 能区神经网络输出值
(a) 网络 1; (b) 网络 2. 图示同图 1.

◆ 数据, ■ 信号, ▨ W^+W^- ▩ $q\bar{q}$.

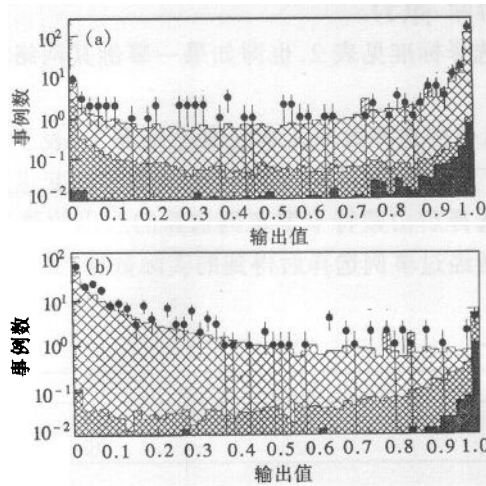


图 3 161GeV 能区神经网络输出值
(a) 网络 1; (b) 网络 2. 图示同图 1.

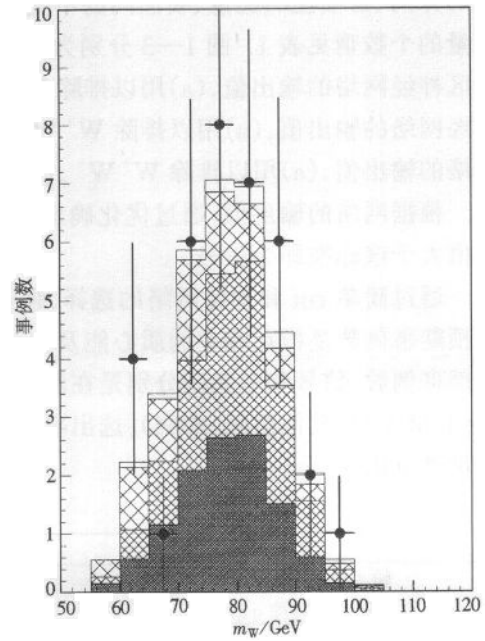


图 4 161GeV—183GeV 能区单 W 粒子强子衰变的不变质量谱
□ ZZ, 其余图示同图 1.

4 轻子道的选择

单 W 的轻子道即 $e^+e^- \rightarrow e^+ \nu_e W^-$, $W^- \rightarrow l^- \bar{\nu}_l$ ($l=e, \mu, \tau$) 或其电荷共轭过程. 其特点是末态只有一个带电轻子可以被探测到. 主要本底来自:

$$e^+e^- \rightarrow l^+l^-, e^+e^- \rightarrow e^+e^-l^+l^-, e^+e^- \rightarrow e^+\nu_l l^- \bar{\nu}_l.$$

$W \rightarrow e\nu_e, \mu\nu_\mu, \tau\nu_\tau$ 各道的选择分别介绍如下:

(1) $W \rightarrow e\nu$ 事例的选择

其事例特点是一根径迹带一个电磁量能器的簇射团. 为此要求径迹室中有且只有一根好径迹与电磁量能器唯一的一个簇射团相匹配. 簇射团的形状与电磁簇射相符合, 具体地: 能量在 20GeV 与 70GeV 之间, $E_9/E_{25} > 0.95$, 其中 E_9 为最高能量输出周围 3×3 个晶体能量输出之和, E_{25} 则为 5×5 个晶体能量输出之和. 强子量能器的能量小于 2GeV, μ 漂移室中无径迹. 为了抑制 Bhabha 本底, 要求电子极角 θ_e 在 0.8—2.3rad 之间.

(2) $W \rightarrow \mu\nu$ 事例的选择

在径迹室中只有一根径迹, 并与 μ 子漂移室唯一的一根径迹相匹配. 强子量能器中的能量沉积小于 5GeV, 电磁量能器能量小于 0.5GeV, 而 μ 子漂移室径迹的动量在 20GeV—80GeV 之间.

(3) $W \rightarrow \tau\nu$ 事例的选择

τ 事例的衰变产物可以是 e, μ 或强子. 由于 τ 到 e, μ 的衰变与前面所说的 W 直接衰变到 e, μ 的情况无法区分, 所以在此只考虑 τ 到强子的衰变. 要求在径迹室中有一根或三根好径迹, 与这些径迹相匹配的量能器簇射形状与强子型相符合. 为此要求 μ 子漂移室中无径迹, $E_9/E_{25} < 0.95$, $E_{\text{leg}} + E_{\text{had}} > 10\text{GeV}$, 且 $E_{\text{leg}}/(E_{\text{leg}} + E_{\text{had}}) < 0.9$, 其中 E_{leg} 为电磁量能器能量, 而 E_{had} 为强子量能器能量.

各对撞能量单 W 轻子衰变道 Monte Carlo 预期事例数和实际选出的事例数见表 4.

表 4

E_{cm}/GeV	反应末态	信号	本底	实际事例数
161	$e\nu e\nu$	0.16	0.11	1
	$e\nu\mu\nu$	0.15	0.12	0
	$e\nu\tau\nu$	0.11	0.04	0
	$e\nu q\bar{q}$	1.0	2.7	4
172	$e\nu e\nu$	0.27	0.10	0
	$e\nu\mu\nu$	0.20	0.08	0
	$e\nu\tau\nu$	0.12	0.08	1
	$e\nu q\bar{q}$	1.4	3.9	5
183	$e\nu e\nu$	1.6	1.2	3
	$e\nu\mu\nu$	1.3	1.8	3
	$e\nu\tau\nu$	1.0	0.5	2
	$e\nu q\bar{q}$	9.2	15.0	26

5 结果

5.1 截面拟合结果

令似然函数

$$L = \prod_i P(N_{\text{obs}}^i, N_p^i),$$

其中 P 为泊松分布, N_{obs}^i 是第 i 个 bin 中选出的事例数, 强子道对质量谱, 而轻子道对能谱分 bin, $N_p^i = \mathcal{L}(\sigma_s \cdot \epsilon_s^i + \sigma_{\text{bg}} \cdot \epsilon_{\text{bg}}^i)$ 为预期的事例数, 其中 \mathcal{L} 为积分亮度, ϵ 为选择效率, σ 为截面, 下标 s 代表信号, bg 代表本底, σ_{bg} 已知, 当 L 取极大, 即: $\frac{\delta L}{\delta \sigma_s} = 0$ 时可得 σ_s 值. 利

用所选事例和上述最大似然法得到截面拟合结果如下:

161GeV:

$$\text{轻子道: } \sigma(e^+ e^- \rightarrow e\nu_e W \rightarrow e\nu_e l\nu_l) = 0.16_{-0.18}^{+0.18} \text{pb},$$

$$\text{强子道: } \sigma(e^+ e^- \rightarrow e\nu_e W \rightarrow e\nu_e q\bar{q}) = 0.26_{-0.23}^{+0.34} \text{pb},$$

$$\text{总截面: } \sigma(e^+ e^- \rightarrow e\nu_e W) = 0.42_{-0.29}^{+0.38} \text{pb}.$$

172GeV:

$$\text{轻子道: } \sigma(e^+ e^- \rightarrow e\nu_e W \rightarrow e\nu_e l\nu_l) = 0.16_{-0.18}^{+0.18} \text{pb},$$

$$\text{强子道: } \sigma(e^+ e^- \rightarrow \nu_e W \rightarrow \nu_e q\bar{q}) = 0.31^{+0.43}_{-0.30} \text{ pb},$$

$$\text{总截面: } \sigma(e^+ e^- \rightarrow \nu_e W) = 0.47^{+0.46}_{-0.35} \text{ pb}.$$

181GeV:

$$\text{轻子道: } \sigma(e^+ e^- \rightarrow \nu_e W \rightarrow \nu_e l\bar{l}) = 0.19^{+0.14}_{-0.10} \text{ pb},$$

$$\text{强子道: } \sigma(e^+ e^- \rightarrow \nu_e W \rightarrow \nu_e q\bar{q}) = 0.35^{+0.14}_{-0.17} \text{ pb},$$

$$\text{总截面: } \sigma(e^+ e^- \rightarrow \nu_e W) = 0.54^{+0.23}_{-0.20} \text{ pb}.$$

上述所列误差均为统计误差.

5.2 系统误差分析

由于事例数少,目前的误差以统计误差为主.在以下的系统误差分析中考虑了探测器的测量精度, Monte Carlo 与实际之间的差异, Monte Carlo 统计性等因素引起的系统误差.对于轻子道,由于都用简单 cut 选择事例,对每个 cut 晃动 10%,取晃动前后拟合截面之差作为 cut 对系统误差的贡献,然后对所有 cut 的贡献平方相加再开方,这种估计比较保守,尽管如此,系统误差还是相对地小,见表 5.

表 5 轻子道的系统误差

E_{cm}/GeV	轻子道截面的系统误差(pb)
161	0.007
172	0.009
183	0.012

对于强子道,简单 cut 引起的系统误差 161GeV 为 0.11pb, 172GeV 为 0.010pb, 183GeV 为 0.013pb. 神经网络判选引起系统误差可分为输入和输出两部分.对输入部分先选出事例总能量、横动量、各喷注能量、动量丢失方位角等 8 个敏感量.将每个敏感量的 Monte Carlo 分布与真实事例分布的差别作为其系统误差的来源,从而所得输入部分的系统误差:161GeV 为 0.011pb, 171GeV 为 0.011pb, 183GeV 为 0.012pb. 神经网络输出部分对系统误差的贡献 161GeV 为 0.055pb, 171GeV 为 0.058pb, 183GeV 为 0.040pb.

对 Monte Carlo 统计性带来的误差作了估计,由于所用 Monte Carlo 事例数,不管是信号还是本底,均百倍于真实事例,计算所得误差远小于别的来源,因而忽略.强子道总的系统误差见表 6.

表 6 强子道的系统误差

E_{cm}/GeV	强子道截面的系统误差(pb)
161	0.058
172	0.061
183	0.045

5.3 反常耦合常数

根据截面的测量结果得到反常耦合常数为

$$\lambda_\gamma = -0.063_{-0.38}^{+0.79}, \Delta\kappa_\gamma = -0.08_{-0.37}^{+0.38}.$$

在 95% 的置信度上

$$-1.37 < \lambda_\gamma < 0.92, -0.65 < \Delta\kappa_\gamma < 0.82.$$

6 讨论

在 161 GeV, 172 GeV, 183 GeV 3 个对撞能量上测得的单 W 产生截面分别为:

$$161\text{GeV} \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow e\nu_e W) = 0.42_{-0.29}^{+0.38} \pm 0.058\text{pb},$$

$$172\text{GeV} \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow e\nu_e W) = 0.47_{-0.35}^{+0.46} \pm 0.061\text{pb},$$

$$183\text{GeV} \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow e\nu_e W) = 0.54_{-0.20}^{+0.23} \pm 0.045\text{pb}.$$

测量结果与 Monte Carlo 产生器 EXCLIBUR 和 GRC4F 预言的对比见图 5. 如图所示, 在误差范围内, 两个产生器的预言均与测量结果一致. 在 95% 置信度上, 反常耦合常数

$$-1.37 < \lambda_\gamma < 0.92, \quad -0.65 < \Delta\kappa_\gamma < 0.82$$

与标准模型的理论预言相符合. 本文结果与 L3 所发表的结果^[13]是一致的. L3 的结果为

$$-0.86 < \lambda_\gamma < 0.75, \quad -0.46 < \Delta\kappa_\gamma < 0.57,$$

其所用的拟合方法为双参数拟合, 同时考虑 λ_γ 与 $\Delta\kappa_\gamma$ 的变化并考虑了在 W 对产生过程中的 $\Delta\kappa_Z = \Delta\kappa_\gamma$. 而本文使用单参数拟合分别考虑 λ_γ 与 $\Delta\kappa_\gamma$ 的变化. 目前由于事例数少, 误差较大, 随着能量和积分亮度的提高, 将给出更精确的结果.

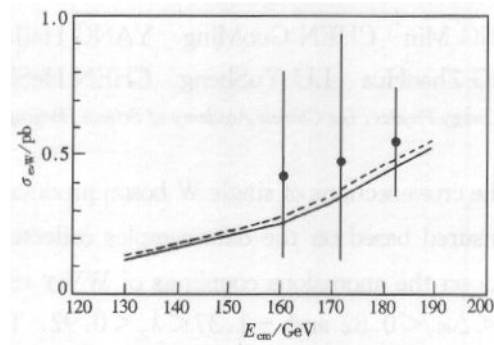


图 5 单 W 产生截面随质心能量的变化

♦ 数据, — EXCALIBUR, GRC4F.

参考文献(References)

- 1 Tsukamoto T, Kurihara Y. Phys. Lett., 1996, **B389**:162; YANG Min. The Experiment Study of the Triple Gauge Boson $WW\gamma$ Couplings. Ph. D. Thesis. IHEP, 1999
(杨民. 三规范玻色子 $WW\gamma$ 耦合实验研究. 博士论文. 中国科学院高能物理研究所, 1999)
- 2 L3 Collaboration. Nucl. Instr. Meth., 1989, **A275**: 81; 1990, **A289**: 35; 1991, **A302**: 53; 1992, **A323**: 109; 1994, **A349**: 345; 1996, **A383**: 342
- 3 Berends F A, Kleiss R, Pittau R. Nucl. Phys., 1994, **B424**: 308; 1994, **B426**: 344; Nucl. Phys. (Proc. Suppl.), 1994, **B37**: 162; Phys. Lett., 1994, **B335**: 490
- 4 Jadach S, Ward B F L, Was Z. Comp. Phys. Comm., 1994, **79**: 503
- 5 Skrzypek M et al. Comp. Phys. Comm., 1996, **94**: 216
- 6 Field J H. Phys. Lett., 1994, **B323**: 432
- 7 Karlen D. Nucl. Phys., 1987, **B289**: 23
- 8 Sjostrand T. CERN-TH/7112/93, Comp. Phys. Comm., 1994, **82**: 74
- 9 Engel R. Z. Phys., 1995, **C66**: 203; Engel R. Phys. Rev., 1995, **D52**: 1459
- 10 Brun R et al. CERN DD/EE/84 - 1
- 11 Fesefeldt H. RWTH Aachen Report PITHA 85/02, 1985
- 12 CHEN GuoMing, CHEN Gang. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1995, **19**(8): 692
(陈国明, 陈刚. 高能物理与核物理, 1995, **19**(8): 692)
- 13 L3 Collaboration. Phys. Lett., 1998, **B436**: 417

Measurement of the Cross-Section of Single W Boson Production and the Anomalous Couplings on L3 Experiment*

YANG Min CHEN GuoMing YANG HaiJun
XIONG ZhaoHua LÜ YuSheng CHEN HeSheng

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract In this paper, the cross-sections of single W boson production $e^+e^- \rightarrow e^-\bar{\nu}_e W^+$ and $e^+e^- \rightarrow e^+\nu_e W^-$ were measured based on the data samples collected by the L3 detector in 1996 and 1997. The limits on the anomalous couplings of $WW\gamma$ triple gauge boson are derived at 95% CL: $-0.65 < \Delta\kappa_\gamma < 0.82$ and $-1.37 < \lambda_\gamma < 0.92$. The results are consistent with the Standard Model predictions and no anomalous couplings are found.

Key words cross-section of single W boson production, gauge boson, coupling, standard Model

Received 1 December 1999, Revised 17 March 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19675047, 19555003)