

带电的希格斯玻色子与 W 玻色子在 ILC 上的联合产生

曹 军¹, 申杰奋², 刘要北¹

(1. 河南科技学院 机电学院, 河南 新乡 453003; 2. 新乡医学院 生物医学工程学院, 河南 新乡 453003)

摘 要: 带有单个电荷和双电荷的希格斯玻色子(H^\pm 和 $H^{\pm\pm}$) 是希格斯三重态模型中的特征粒子. 主要研究在高能直线对撞机上带电的希格斯玻色子与 W 玻色子的联合产生过程: $e^+e^- \rightarrow W^+H^+H^-$. 计算了该过程的产生截面、末态粒子的横动量和快度的分布, 并分析了标准模型的背景. 结果表明, 产生截面在一定的参数空间内可以达到几个飞靶的量级. 只要带电希格斯玻色子的质量不是很大, 在未来的高能直线对撞机上实验中可以通过该过程探测到这些带电希格斯玻色子的信号.

关键词: 希格斯三重态模型; 带电的希格斯玻色子; 国际高能直线对撞机

中图分类号: O413.3

文献标志码: A

2012 年 7 月, 欧洲核子中心宣布在质量为 125 GeV 附近发现一个中性标量粒子, 这是粒子物理学领域的一个重要里程碑. 越来越多的实验数据表明, 它与标准模型(SM)中预言的希格斯玻色子性质十分接近^[1]. 然而 SM 中仍存在一些问题, 如不能解释中微子质量和暗物质等. 为了解决这些问题, 人们提出了许多超出 SM 的新物理, 其中有些预言了 SM 中不存在的带单个电荷和双电荷的希格斯玻色子的存在, 如左右手模型、3-3-1 模型以及本文关注的希格斯三重态模型^[2]等. 一旦发现这些新的带电希格斯玻色子的信号, 就可以直接证实新物理的存在. 因此研究这些新的带电希格斯玻色子在高能对撞机上的独特信号对新物理的检验具有重要的物理意义.

希格斯三重态模型(HTM)是为了解释中微子质量产生和混合机制所提出的一种新模型. 该模型包括一个超荷 $Y=1/2$ 的同位旋二重态标量场和一个超荷为 1 的同位旋三重态标量场. 除了类 SM 中的希格斯玻色子 h , 该模型还预言了一个 CP 为偶的中性标量粒子 H , 一个 CP 为奇的中性标量粒子 A , 一对带有单个电荷的希格斯玻色子 H^\pm 和一对带有双电荷的希格斯玻色子 $H^{\pm\pm}$. 其中带双电荷的希格斯玻色子 $H^{\pm\pm}$ 是该模型中的特征粒子, 因此对 $H^{\pm\pm}$ 在高能对撞机上的唯象学有很多的相关研究. 目前的 LHC 实验上通过对双轻子衰减道的研究得到 $H^{\pm\pm}$ 质量下限为大约 400 GeV^[3-4]. 然而, 在该模型中 $H^{\pm\pm}$ 的衰变方式主要与三重态标量场的真空期望值 v_i 有关: 当 v_i 较小时, $H^{\pm\pm}$ 主要衰变成两个同号的轻子; 当 v_i 较大时, $H^{\pm\pm}$ 主要衰变成两个同号的 W 玻色子, 这时现有的质量限制将不再适用, $H^{\pm\pm}$ 也可能较轻. 当 $H^{\pm\pm}$ 主要衰变到一对 W 玻色子时, 由目前 LHC 上的实验数据得出对 $H^{\pm\pm}$ 质量的限制为 85 GeV^[5]. 相对于大型强子对撞机 LHC, 国际高能直线对撞机(ILC)有着更高的年积分亮度和更干净的探测背景^[6]. 因此, 研究新粒子在 ILC 上的产生过程更能精确的检验新粒子的性质, 并且在其它新物理模型中也有类似的研究^[7-8]. 希格斯三重态模型中存在树图水平上的规范耦合 $W^\pm H^\pm H^{\mp\pm}$, 因而它们的联合产生过程能够精确检验这种规范耦合. 本文主要目的是研究带单电荷和双电荷的希格斯玻色子与 W 玻色子在 ILC 上的联合产生过程: $e^+e^- \rightarrow W^+H^+H^-$.

1 相关耦合

在 HTM 中, 除了一个二重态标量场 Φ 以外, 还引入一个复的 $SU(2)_L$ 同位旋三重态标量场. 它们的真

收稿日期: 2015-03-19; 修回日期: 2015-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金(U1304112); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2014GGJS-160).

第 1 作者简介(通信作者): 刘要北(1980-), 男, 河南禹州人, 河南科技学院副教授, 博士, 研究方向为理论物理, E-mail:

liuyaobei@hist.edu.cn.

空期望值分别可表示为:

$$\langle \Phi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_d \end{pmatrix}, \langle \Delta \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ v_t & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中, v_d 和 v_t 满足 $v^2 = v_d^2 + 4v_t^2 = 246 \text{ GeV}$. 这里, v_t 受到 ρ 参数的实验限制并小于 8 GeV . 因为 v_t 较小(如 MeV 量级)时,带双电荷希格斯质量受 LHC 实验限制较强,本文考虑 v_t 取较大值(如 1 GeV)时的情况.

当 $v_t = 1 \text{ GeV}$ 时,文献[9]表明 $H^{\pm\pm}$ 主要衰变为 $W^\pm W^\pm$ 且分支比为 100% ,而 H^\pm 可能衰变到 tb, WZ 和 Wh ,其衰变宽度

$$\Gamma(H^\pm \rightarrow t\bar{b}) \approx \frac{3G_F^2 m_t^2 m_H}{2\pi} \left(1 - \frac{m_t^2}{m_H^2}\right)^2, \quad (2)$$

$$\Gamma(H^\pm \rightarrow W^\pm Z) \approx \frac{G_F^2 m_H^3}{4\pi} [\beta(m_H, m_W, m_Z)]^3, \quad (3)$$

$$\Gamma(H^\pm \rightarrow W^\pm h) \approx \frac{G_F^2 m_H^3}{4\pi} \left(\frac{2m_H^2}{m_H^2 - m_h^2} - 1\right)^2 \times [\beta(m_H, m_W, m_h)]^3, \quad (4)$$

其中,

$$\beta(m_1^\pm, m_2, m_3) = \sqrt{1 - \frac{(m_2 + m_3)^2}{m_1^2}} \sqrt{1 - \frac{(m_2 - m_3)^2}{m_1^2}}. \quad (5)$$

为了计算方便,认为 H^\pm 和 $H^{\pm\pm}$ 的质量是兼并的并用 m_H 表示. 通过以上公式可以得出单个带电希格斯玻色子各个衰变方式的分支比,相关结果在表 1 中列出.

表 1 单电荷希格斯玻色子 H^\pm 的衰变分支比

m_H/GeV	200	300	400	500	600	700
$B_r(H^\pm \rightarrow t\bar{b})$	0.66	0.41	0.31	0.24	0.18	0.14
$B_r(H^\pm \rightarrow W^\pm Z)$	0.31	0.25	0.31	0.35	0.39	0.41
$B_r(H^\pm \rightarrow W^\pm h)$	0.03	0.34	0.38	0.41	0.43	0.44

在 HTM 中,相关的耦合顶角

$$A_\mu H^- H^+ : -ie(p_2 - p_3)_\mu, A_\mu H^- H^{++} : -2ie(p_2 - p_3)_\mu; \quad (6)$$

$$Z_\mu H^- H^+ : -i \frac{eS_W}{C_W} (p_2 - p_3)_\mu, Z_\mu H^- H^{++} : -i \frac{e(1 - 2S_W^2)}{S_W C_W} (p_2 - p_3)_\mu; \quad (7)$$

$$A_\mu W_\nu^+ H^+ H^- : -3i \frac{e^2}{S_W} g_{\mu\nu}, Z_\mu W_\nu^+ H^+ H^- : -4i \frac{e^2 \sqrt{1 - 2S_W^2}}{S_W C_W} g_{\mu\nu}; \quad (8)$$

$$W_\mu^+ H^+ H^- : -i \frac{e}{S_W} (p_2 - p_3)_\mu. \quad (9)$$

其中, p_2 和 p_3 分别是第 2、第 3 个粒子的动量. 由上述耦合顶角可知,带电的希格斯玻色可协同 W 玻色子在直线对撞机上协同产生,相关的费曼图如图 1 所示.

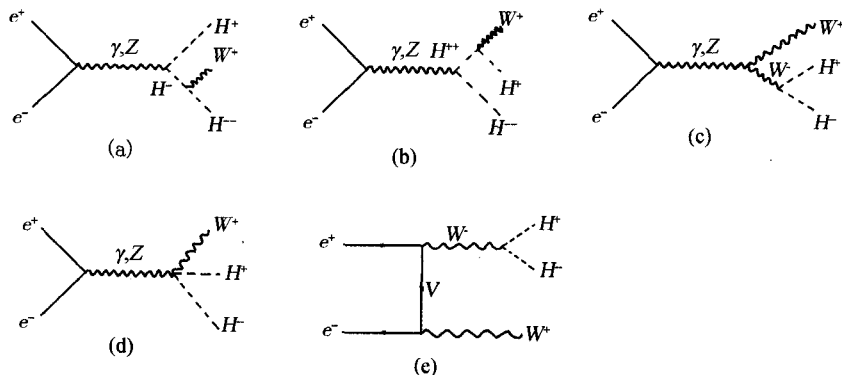


图1 $e^+e^- \rightarrow WHH$ 过程的费曼图

2 数值计算与分析

在数值计算中,采用文献[10]中的数据作为 SM 中的输入参数.这时产生截面只与两个参数有关:质心能量 \sqrt{s} 和质量参数 m_H .把新的耦合方式加入到 CalcHEP 程序包中进行相关的数值计算.本文中,产生截面的单位用飞靶(fb)表示: $1\text{fb} = 10^{-43} \text{m}^2$.

图 2 中表示了该过程的产生截面分别在 3 个质心能量下随着带电希格斯粒子质量的变化情况.可以发现:1)产生截面随质量的增加而减小,这是因为相空间的压低;2)对于较大质量的带电希格斯玻色子需要更高的质心能量才可以产生足够多的事例.如当质心能量取 1TeV,质量参数在 200~400 GeV 时,产生截面所在的范围是 0.12~7.6 fb;当质心能量取 2TeV,质量参数在 200~800 GeV 时,产生截面所在的范围是 0.22~15 fb.

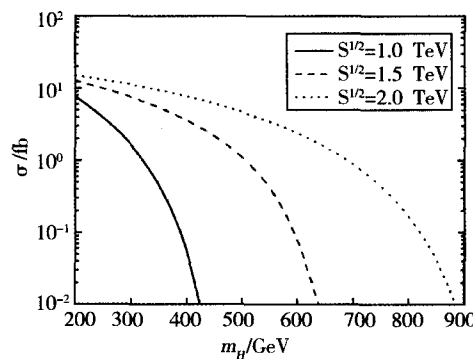


图2 过程的产生截面随 m_H 的变化曲线

图 3 中带电希格斯粒子的质量参数为 300 GeV.从图 3(a)可看出,当 W 玻色子和 $H^{\pm\pm}$ 的横动量分别取大约 100 GeV 和 270 GeV 左右时,产生截面可达到最大值.从图 3(b)可看出它们的快度分布都趋于中间区域.这是因为它们的产生方向总是相反的.

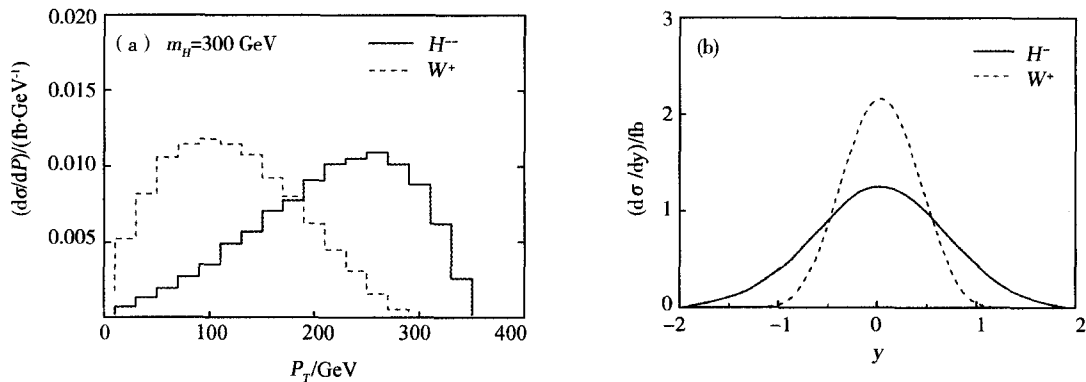


图 3 末态粒子的横动量和快度分布(取质心能量为1 TeV)

下面讨论该过程的相关背景.对于 $e^+e^- \rightarrow W^+H^+H^-$ 过程,考虑带单个电荷和 2 个电荷的希格斯玻色子的衰变,末态的特征信号是 $4W+2b$.考虑到 2 个同号电荷的 W 玻色子的轻子衰变以及另外 2 个 W 玻色子的强子衰变方式.最终的末态信号是 2 个同号的轻子、一对底夸克、4 个介子再加上丢失的能量.这时最大的背景来自于标准模型中的过程 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-t\bar{t} \rightarrow 4W+2b$.根据以下衰变分支比

$$B_r(W^+W^+W^-W^- \rightarrow l_i^\pm \nu l_j^\pm \nu 4j) \approx 2 \times \left(\frac{2}{9}\right)^2 \times \left(\frac{6}{9}\right)^2 \approx 0.044 \quad (7)$$

可以计算出相关的信号与背景的事例数从而计算出信噪比 S/\sqrt{B} .

表 2 质心能量为 2TeV 时末态信号的信噪比

m_H/GeV	200	300	400	500	600	700
S/\sqrt{B}	21	16	11.3	7.4	4.2	1.8

表 2 给出了当质心能量取 2 TeV, 积分亮度为 500 fb^{-1} 时末态的信噪比 S/\sqrt{B} . 从结果可以看出当质量参数小于 600 GeV 时, 信噪比的数值大于 5, 因此, 可以通过这个过程在未来的 ILC 实验中观测到它的信号. 在计算过程中取轻子的探测效率为 70%. 当然, 为了更有效地降低标准模型背景, 可以采取对末态施加各种截断及粒子质量的重构的方法, 本文中并没有考虑对任何物理可观测量的截断.

3 结 论

带单个电荷的希格斯玻色子和双电荷的希格斯玻色子 (H^\pm 和 $H^{\pm\pm}$) 是希格斯三重态模型的特征粒子. 本文研究了 ILC 上的带电的希格斯玻色子与 W 玻色子的联合产生过程: $e^+ e^- \rightarrow W^+ H^+ H^-$. 通过计算产生信号和相关的标准模型背景分析, 可以看出, 只要带电希格斯玻色子的质量不是很大, 在将来的 ILC 对撞机实验上可以通过该过程观测到这些带电希格斯玻色子的独特信号, 从而为检验该新物理模型提供了一个途径.

参 考 文 献

- [1] 王 青. 规范粒子获得质量之路: 解读 2013 年诺贝尔物理学奖 [J]. 科学通报, 2001, 58(34): 3483-3484.
- [2] Cheng T P, Li L F. Neutrino Masses, Mixings and Oscillations in $SU(2) \times U(1)$ Models of Electroweak Interactions [J]. Phys Rev D, 1980, 22: 2860.
- [3] Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al. A search for a doubly-charged Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$ [J]. Eur Phys J C, 2012, 72: 2189.
- [4] ATLAS Collaboration. Search for doubly charged Higgs bosons in like-sign dilepton final states at $\sqrt{s}=7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector [J]. Eur Phys J C, 2012, 72: 2189.
- [5] Kanemura S, Yagyu K, Yokoya H. First constraint on the mass of doubly-charged Higgs boson in the same-sign diboson decay scenario at the LHC [J]. Phys Lett B, 2013, 726: 316-319.
- [6] 高 杰. 国际直线对撞机研究现状及未来发展 [J]. 物理, 2011, 40(06): 360-365.
- [7] 杜霖霖, 王学雷. LH 模型中单个类矢顶夸克在 TeV 能级对撞机上的产生 [J]. 河南师范大学学报 (自然科学版), 2008, 36(03): 153-153.
- [8] 申杰奋, 杜霖霖, 王学雷. TC2 模型中 Top-pion 介子在 ILC 上的产生 [J]. 河南师范大学学报 (自然科学版), 2009, 37(06): 69-70.
- [9] Perez P F, Han T, Huang G Y, et al. Neutrino Masses and the CERN LHC: Testing Type II Seesaw [J]. Phys Rev D, 2008, 78: 015018.
- [10] Particle Data Group collaboration. The Review of Particle Physics [J]. Chin Phys C, 2014, 38: 090001.

Associated Production of the Charged Higgs Bosons with W Boson at ILC

CAO Jun¹, SHEN Jiefen², LIU Yaobei¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, 453003, China;

2. School of Biomedical Engineering, XinXiang Medical University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The singly and doubly charged Higgs bosons (H^\pm and $H^{\pm\pm}$) are the typical particles predicted in the Higgs Triplet Model (HTM). In this paper, we focus on the study of the singly and doubly charged Higgs bosons associated production process: $e^+ e^- \rightarrow W^+ H^+ H^-$. We present the production cross sections and the distributions of the transverse momenta and the rapidity distributions for out-going particles. The results show that the production rates can reach the level of several fb with reasonable parameter values. As long as the doubly charged Higgs mass are not too heavy, the possible signals of singly and doubly charged Higgs bosons might be detected via this process in the future high-energy linear collider experiments.

Keywords: Higgs triplet model; charged Higgs bosons; high-energy linear collider