

HTM模型中带电希格斯玻色子在ILC上的联合产生

高银浩, 曹军, 韩红梅

(河南科技学院机电学院, 河南新乡 453003)

摘要:希格斯三重态模型(HTM)预言了类标准模型的中性希格斯玻色子 h ,还预言了单电荷和双电荷希格斯玻色子($H^\pm, H^{\pm\pm}$)的存在.主要研究了在光子对撞机上的两个三体产生过程: $\gamma\gamma \rightarrow hH^+H^-$ 和 $\gamma\gamma \rightarrow hH^{++}H^{--}$.计算结果表明,在合理的参数空间内,两种过程的产生截面分别达到几十 fb 和一百多 fb,分析了主要的标准模型背景并计算了信噪比.由于较低的标准模型背景,在未来的高能直线对撞机上实验中可以通过这些过程探测到带电标量粒子 H^\pm 和 $H^{\pm\pm}$ 的信号.

关键词:希格斯三重态模型;单电荷和双电荷希格斯玻色子;高能光子对撞机

中图分类号:O413.3

文献标志码:A

2012年7月4日,欧洲核子中心宣布发现一个中性希格斯粒子.该发现直接导致提出自发对称破缺机制的P. W. Higgs和F. Englert获得2013年的诺贝尔物理学奖.这是粒子物理领域的一个里程碑.它也标志着标准模型(SM)中希格斯机制的巨大成功^[1].然而SM中也存在规范等级和不能解释中微子质量等问题.这也预示着在较高能标会有新物理出现.许多新物理需要对SM中的希格斯项进行扩充.在这些扩充项中就包含了SM中不存在的带电希格斯玻色子.一旦发现这些带电希格斯的信号就可以证实新物理的存在,因此研究这些带电希格斯在将来高能对撞机上的信号对新物理的检验有重要的意义.

解释中微子质量产生和混合机制是发现新物理中的一个关键问题.它已经引起很多物理学家的关注.其中type-II seesaw机制是产生中微子质量的最吸引人的理论之一.希格斯三重态模型(HTM)是该机制的具体实现^[2].该模型包括一个复二重态希格斯场和一个超荷 $Y=2$ 的复标量三重态场,通过自发对称性破缺之后产生7个物理希格斯标量粒子:2个CP为偶的中性标量粒子(h 和 H)、1个CP奇的中性标量粒子(A)、1对单电荷标量粒子(H^\pm)和1对双电荷标量粒子($H^{\pm\pm}$),其中带电的标量粒子,尤其是带双电荷的希格斯粒子是该模型中的特征粒子,因此对带电粒子在光子对撞机上的产生有很多的相关研究. Tevatron上通过对衰变道 $H^{\pm\pm} \rightarrow \lambda^\pm \lambda^\pm$ 的研究得出带电 $H^{\pm\pm}$ 质量 $m_{H^{\pm\pm}}$ 的下限为110~150 GeV^[3-4].相对于强子对撞机,国际高能直线对撞机(ILC)有着更高的亮度和更精细的观测环境.本文主要目的是探讨在HTM中带电标量粒子和类标准模型的希格斯玻色子在ILC上通过 $\gamma\gamma$ 碰撞的产生过程.

1 模型参数与相关耦合

在HTM中,除了一个二重态标量场 Φ 以外,引入一个 $Y=2$ 的复 $SU(2)_L$ 同位旋三重态标量场,它们可以写为:

$$\Delta = \begin{pmatrix} \delta^{++}/\sqrt{2} & \delta^{++} \\ \delta^0 & -\delta^+/\sqrt{2} \end{pmatrix}, \Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}.$$

希格斯二重态和三重态的真空期望值(VEVs)分别为:

收稿日期:2014-12-16;修回日期:2015-04-07.

基金项目:国家自然科学基金(U1304112)

第1作者简介(通信作者):高银浩(1978-),女,河南郟县人,河南科技学院讲师,研究方向为理论物理,E-mail:gaoyinhaoding@163.com.

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

其中, $v^2 = v_d^2 + 4v_t^2 = 246 \text{ GeV}$.

根据文献[5],模型参数取值为 $v_t = \mu = 1 \text{ GeV}$, $\lambda = 0.52$, $0 < \lambda_1 < 1$, $\lambda_3 = 2\lambda_2 = 0.2$, $-2 < \lambda_4 < 1$. 希格斯玻色子的质量可以表示为:

$$m_h^2 \approx \frac{\lambda}{2} v_d^2 \approx (125.5 \text{ GeV})^2, m_{H^\pm}^2 \approx m_A^2 \approx \frac{\sqrt{2}\mu v_d^2}{2v_t}, m_{H^{\pm\pm}}^2 = \frac{\sqrt{2}\mu v_d^2 - \lambda_4 v_d^2 v_t - 2\lambda_3 v_t^3}{2v_t}, m_{H^\pm}^2 = \frac{(v_d^2 + v_t^2)[2\sqrt{2}\mu - \lambda_4 v_t]}{4v_t} \approx m_{H^{\pm\pm}}^2 + \frac{\lambda_4}{4} v_d^2.$$

当 $v_t = 1 \text{ GeV}$, 文献[6]所示双电荷玻色子 $H^{\pm\pm}$ 主要衰变为 $W^\pm W^\pm$, 而 H^\pm 可能衰变 $\bar{b}b, W^\pm Z$ 和 $W^\pm h$. 这些过程的衰减宽度可表示如下:

$$\begin{aligned} \Gamma(H^\pm \rightarrow W^\pm Z) &\approx \frac{G_F^2 m_{H^\pm}^3}{4\pi} [\beta(m_{H^\pm}, m_W, m_Z)]^3, \\ \Gamma(H^\pm \rightarrow W^\pm h) &\approx \frac{G_F^2 m_{H^\pm}^3}{4\pi} \left(\frac{2m_{H^\pm}^2 - \lambda_4 v^2}{m_{H^\pm}^2 - m_h^2} - 1 \right)^2 \times [\beta(m_{H^\pm}, m_W, m_h)]^3, \\ \Gamma(H^\pm \rightarrow \bar{b}b) &\approx \frac{3G_F^2 m_t^2 m_{H^\pm}}{2\pi} \left(1 - \frac{m_t^2}{m_{H^\pm}^2} \right)^2, \end{aligned}$$

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

在 HTM 中, 相关的耦合顶角可以写为:

$hH^{++}H^{-} : -\lambda_1 v_d, hH^+H^- : -\left(\lambda_1 + \frac{\lambda_{41}}{4}\right)v_d, A_\mu H^-H^+ : -ie(p_2 - p_3)_\mu, A_\mu H^{--}H^{++} : -2ie(p_2 - p_3)_\mu, A_\mu A_\nu H^-H^+ : 2ie^2 g_{\rho\nu}, A_\mu A_\nu H^-H^{++} : 8ie^2 g_{\rho\nu}$. 其中, p_2, p_3 分别是第二、第三个粒子的动量.

带电标量粒子在 ILC 上通过 $\gamma\gamma \rightarrow hH^+H^-$ 和 $\gamma\gamma \rightarrow hH^{++}H^{--}$ 过程的联合产生的费曼图如图 1 所示.

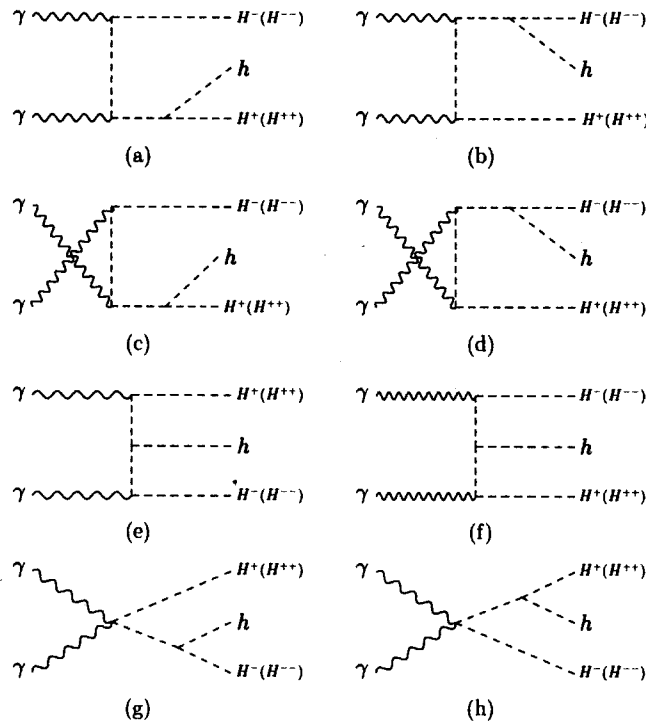


图1 HTM中 $\gamma\gamma \rightarrow hH^+h(hH^{++}H^-)$ 过程的费曼图

2 数值计算与分析

在数值计算中,采用文献[7]中的数据作为 SM 中的输入参数, λ_1, λ_4 是 HTM 中的自由参数,用 CalcHEP 程序包进行相关的数值计算^[8].

在质心能量 $\sqrt{s} = 1.0$ TeV, $m_h = 125.5$ GeV, $\gamma\gamma \rightarrow hH^+ H^-$ 和 $\gamma\gamma \rightarrow hH^{++} H^{--}$ 两个过程的产生截面在 λ_1 取不同值时随 λ_4 的变化曲线如图 2 所示. 从图 2(a) 看出, $\gamma\gamma \rightarrow hH^+ H^-$ 的产生截面 σ_1 随 λ_4 的增加而增大. 主要是因为 1) 相空间随着 m_{H^\pm} 减小而增大; 2) 产生截面与 $hH^+ H^-$ 的耦合强度 $(\lambda_1 + \lambda_4/2)^2$ 成正比. 当 $\lambda_4 = 0, 2 \leq \lambda_1 \leq 8$ 时, 产生截面 σ_1 所在的范围是 0.59 ~ 9.35 fb.

图 2(b) 所示的 $\gamma\gamma \rightarrow hH^{++} H^{--}$ 过程的产生截面 σ_2 随参数的变化情况. 可以看出 σ_2 的数值能达到上百 fb. 当 $\lambda_4 = 0, 2 \leq \lambda_1 \leq 8$ 时, 产生截面 σ_2 所在的范围是 9.4 ~ 150 fb. 从图上看出 $\lambda_4 = 0$ 时, $m_{H^\pm} = m_{H^{++}}$ 都是 206.9 GeV.

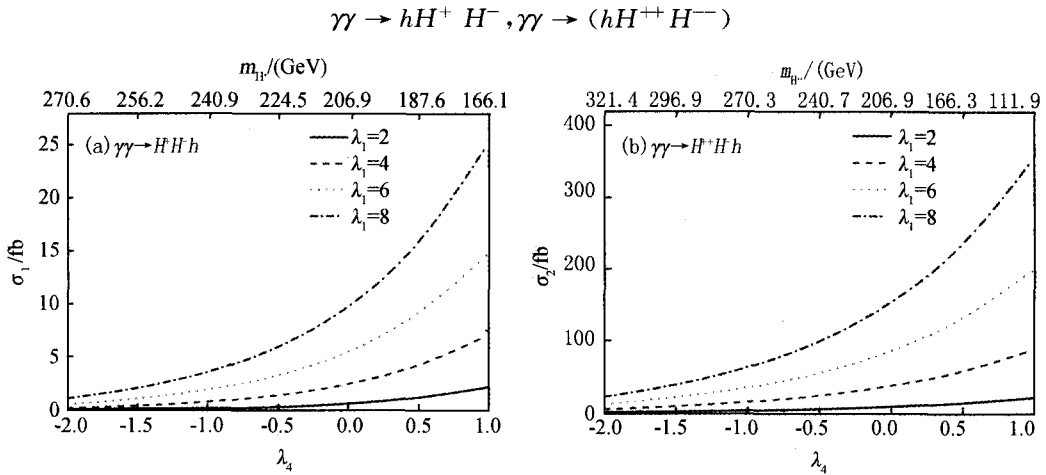


图2 $\gamma\gamma \rightarrow hH^+ H^-, \gamma\gamma \rightarrow (hH^{++} H^{--})$ 过程的产生截面随 λ_4 变化的曲线图.

下面讨论 $\lambda_4 = 0$ 时以上两个过程的相关 SM 背景. 在这种情况下, 分支比 $Br(H^+ \rightarrow t\bar{b}) \approx 0.7$, 因此主要的衰减模式是 $H^+ \rightarrow t\bar{b}$. 根据文献[6]对双电荷带电标量的主要衰减模式的研究, 当 $v_t > 0.4$ MeV 时, 双电荷希格斯玻色子 H^{++} 主要衰变成两个 W^+ , 分支比 $Br(H^{++} \rightarrow W^+ W^+) \approx 100\%$.

对于 $\gamma\gamma \rightarrow hH^+ H^-$ 过程, 考虑子衰变过程 $H^+ \rightarrow t\bar{b}, t \rightarrow W^+ b \rightarrow \ell^+ \nu_b, hH^+ H^-$ 特征信号是 $6b + 2\ell + E$, 这里 E 表示丢失的能量. 由于 $Br(h \rightarrow t\bar{b}) \approx 0.57$, 末态 $t\bar{b}b\bar{b}$ 的产生率很容易由下式算出: $\sigma_s = \sigma \times Br(h \rightarrow t\bar{b}) \times Br^2(H^+ \rightarrow t\bar{b}) \approx 0.28\sigma$.

主要背景来自 SM 的一些过程: $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}hh, \gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}Zh, \gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}ZZ$, 由于 $Z \rightarrow t\bar{b}, h \rightarrow t\bar{b}$ 而得到末态 $t\bar{t}b\bar{b}b\bar{b}$. 相关 SM 背景中各过程的产生截面和在三重态中信号产生率如表 1 所示. 从结果可以看出 SM 中背景非常小, 因而在 ILC 上可以通过该过程观测到相关的信号.

表 1 SM 背景中末态的过程的产生截面和信号产生率

过程	SM 背景	在三重态的信号产生率($\lambda_4 = 0$)	
	产生截面/fb	λ_1	产生截面/fb
$t\bar{t}hh$	1.1×10^{-4}	2	0.16
$t\bar{t}Zh$	1.3×10^{-5}	4	0.66
$t\bar{t}ZZ$	4.5×10^{-6}	6	1.47
总的	1.3×10^{-4}	8	2.62

对于 $\gamma\gamma \rightarrow hH^{++} H^{--}$ 过程, 考虑到相应的末态衰变过程, $hH^{++} H^{--}$ 的特征信号是 $2b + 4j + 2\lambda + E$ 组成. 主要背景来自 SM 过程 $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}W^+ W^-$. 当 $\sqrt{s} = 1.0$ TeV, 通过计算得到该过程产生截面大约为 0.082 fb. 为了讨论观测该信号的可能性, 计算在 $\sqrt{s} = 1.0$ TeV, 积分亮度为 500 fb^{-1} 时末态的信噪比 (S_s), 如图 3 所示. 从图 3 可知, S_s 的数值在三重态的一个很大参数空间里面都大于 5, 因此, 只要 λ_4 不很小, 双电荷玻色子

就可以通过这个过程在未来的 ILC 实验中观测到它的信号。

3 结 论

三重态希格斯模型预言了单电荷希格斯玻色子和双电荷希格斯玻色子的存在,在未来高能对撞机上发现它们的信号将直接证实新物理的存在.本文研究了在 ILC 上通过光子-光子碰撞的联合产生过程: $\gamma\gamma \rightarrow hH^+H^-$ 和 $\gamma\gamma \rightarrow hH^{++}H^{--}$.通过计算产生截面和相关的背景分析我们可以看出,在将来的 ILC 对撞机实验上可以通过以上过程观测到带电希格斯玻色子的信号,从而为实验上验证 HTM 提供了一个很好的检验途径.

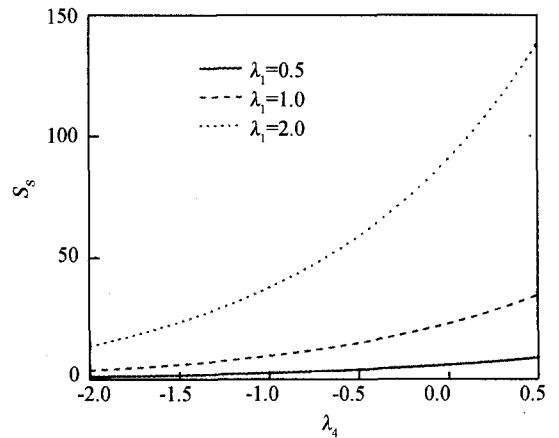


图3 末态的信噪比 (S/N) 随 λ_4 变化的曲线图.

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] D0 Collaboration. Search for pair production of doubly-charged Higgs bosons in the $H^{++}H^{--} \rightarrow \mu^+\mu^+\mu^-\mu^-$ final state at D0[J]. Phys Rev Lett, 2008, 101: 071803.
- [4] CDF Collaboration. Search for Doubly Charged Higgs Bosons with Lepton-Flavor-Violating Decays involving Tau Leptons[J]. Phys Rev Lett, 2008, 101: 121801.
- [5] ARHRIB A, BENBRIK R, CHABAB M, et al. Higgs boson decay into 2 photons in the type-II Seesaw Model[J]. JHEP, 2012(4): 136.
- [6] 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.
- [7] Particle Data Group Collaboration. The Review of Particle Physics [J]. Chin Phys C, 2014, 38: 090001.
- [8] BELYAEV A, CHRISTENSEN N D, PUKHOV A. CalcHEP 3. 4 for collider physics within and beyond the Standard Model [J]. Comput Phys Commun, 2013, 184: 1729-1769.

Associated Production of the Higgs Bosons in the Higgs Triplet Model at the High-Energy Photon Linear Collider

GAO Yin hao, CAO Jun, HAN Hong mei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Besides the SM-like Higgs boson h , the Higgs triplet model (HTM) predicts the existence of charged and doubly charged Higgs bosons ($H^\pm, H^{\pm\pm}$). In this paper, we focus on the study of triple Higgs production in collisions at the high-energy linear collider: $\gamma\gamma \rightarrow hH^+H^-$ and $\gamma\gamma \rightarrow hH^{++}H^{--}$. The numerical results show that, with reasonable parameter values of the cross-sections for two processes can reach the level of several tens of fb and hundreds of fb, respectively. Due to the small SM background, the possible signals of H^\pm and $H^{\pm\pm}$ might be detected via these processes in the future high-energy linear-collider experiments.

Keywords: HTM; charged and doubly charged Higgs bosons; ILC