

LHT 模型预言的新粒子在 高能对撞机上的产生

刘金岩, 岳崇兴, 闻 佳

(辽宁师范大学物理与电子技术学院, 辽宁大连 116029)

摘要: 小 Higgs 理论是超出标准模型的重要的新物理候选者, 最小 Higgs (LH) 模型是此理论最简单的唯象新物理模型, 它具有小 Higgs 理论的所有基本特点, 但是此模型存在精细调节问题。为解决此问题, 人们在 LH 中引入一种新的分立对称性——T 宇称, 从而形成了具有 T 宇称的 LH 模型。LHT 模型不仅解决了 LH 模型的精细调节问题, 而且解决了可能的暗物质候选者。因此 LHT 模型是非常有吸引力的一类小 Higgs 模型。本文讨论了 LHT 模型预言的新规范玻色子 B_H 、T-odd 夸克、重轻子对和标量粒子 (ϕ, ϕ^c, ϕ^+) 在 高能对撞机上的产生。这些粒子可通过以下过程产生: $e^- \gamma \rightarrow L^- B_H$ 、 $\gamma q \rightarrow B_H Q$; $ep \rightarrow \nu_H Q_H$; $e^+ e^- \rightarrow \bar{L}_i L_j$ 及 $q\bar{q} \rightarrow \phi V_H$ 。计算结果表明: 在合理的参数空间, 这些新粒子中的某些粒子能够在将来的高能对撞机上产生可观测的物理信号。此结果对正在运行或即将运行的高能对撞机实验检验小 Higgs 理论探测新粒子有一定的指导意义。

关键词: 高能物理学; LHT 模型; 产生截面; 新粒子

中图分类号: O0572.21

文献标识码: A

文章编号: 1674-2850(2008)08-0827-7

Production of the new particles predicted by the LHT model at high energy collider

LIU Jinyan, YUE Chongxing, WEN Jia

(College of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029)

Abstract: Little Higgs theory is proposed as an interesting solution to the so called hierarchy problem of the standard model (SM) and can be regarded as one of the important candidates for new physics beyond the SM. The littlest Higgs (LH) model is one of the simplest and phenomenological viable models, which has all essential features. However, the LH model has the fine-tuning problem. To alleviate this difficulty, a Z_2 discrete symmetry, named "T parity", is introduced into the LH model, which forms the so-called LHT model. The LHT model predicts the existence of the new particles, such as new gauge bosons, T-odd fermions, and scalars. This paper considers the production of these new particles in future high energy collider experiments. The numerical results show that, in wide range of the parameter space, some of these new particles can generate observable signals in future high energy collider experiments. The results will help to test the Little Higgs theory and further to detect new particles at present and in future high energy collider experiments.

Key words: high energy physics; the LHT model; production cross section; new particle

0 引言

标准模型 (SM) 很好地描述了强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用, 并且与目前大多数实验相符合。但 SM 存在平庸性、等级性等问题, 因此, SM 是一种低能有效理论。为了解决 SM 的诸多问题, 人们提出了一些超出 SM 外的新物理理论和模型。其中比较有代表性的理论有: 超对称理论、额

基金项目: 国家自然科学基金 (10675057); 辽宁省高校创新团队基金

作者简介: 刘金岩 (1987—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 高能物理

通信联系人: 岳崇兴, 教授, 主要研究方向: 高能物理, E-mail: cxyue@lnnu.edu.cn

外维理论和小 Higgs 理论^[1]等。

小 Higgs 理论可以有效地解决 SM 中的等级问题, 被认为是超出 SM 外新物理的重要候选者^[2]。在小 Higgs 理论中, 最小 Higgs (LH)^[3]模型是最简单且在现象学上可行的模型, 它具有小 Higgs 理论的所有基本特点。但是, LH 模型受到了电弱精确测量数据的严格限制, 只有通过精细调节, 模型参数才能令人满意。为此, 人们在 LH 模型中引入一种新的分立对称性 (T 宇称), 从而形成了 LHT 模型^[4]。在 LHT 模型中, 所有 SM 中的粒子都是 T-even, 除了 top 夸克的 T 宇称伙伴外, 所有新粒子都是 T-odd。模型对电弱可观测量的树级修正为零, 圈级修正也非常小。此特点使得 LHT 模型的对称性破缺标度 $f \sim 500$ GeV^[5]。因此, LHT 模型可能在今后的高能实验中产生丰富的实验现象。

目前正在运行或即将运行的高能对撞机主要有国际高能直线对撞机 (ILC)、直线—环形 ep 对撞机 (THERA) 及大型强子对撞机 (LHC)^[6]等。其中 ILC 的质心能量达到 500 GeV, 积分亮度 \mathcal{L} 为 $200 \sim 600$ fb⁻¹; THERA 对撞机质心能量为 3.7 TeV, 积分亮度 \mathcal{L} 约为 4 fb⁻¹; 即将运行的 LHC 质心能量约为 14 TeV, 积分亮度 \mathcal{L} 约为 100 fb⁻¹。ILC 上很多过程背景小, 产生的事例数清晰, 而 LHC 的质心能量大, 能够产生质量很大的新粒子, 因此 ILC 与 LHC 相互配合^[6]可帮助人们更好地认识自然界。

LHT 模型预言了一些新粒子, 如重规范玻色子 (B_H, Z_H, W_H^\pm), T-odd 夸克、重轻子对以及标量粒子 (ϕ^0, ϕ^P, ϕ^\pm) 等。本文主要考虑了这些新粒子在高能对撞机上的产生, 并讨论了探测这些新粒子的可能性。

1 LHT 模型简介

类似于 LH 模型, LHT 模型基于 $SU(5)/SO(5)$ 整体对称性破缺模式。 $SU(5)$ 整体对称性规范子群 $[SU(2)_1 \times U(1)_1] \times [SU(2)_2 \times U(1)_2]$ 在 f 标度下破缺到 SM 电弱对称群 $SU(2)_L \times U(1)_Y$, 从而产生了 SM 预言的粒子和新的规范玻色子、标量粒子以及 T-odd 费米子等。在 T 宇称下, SM 的规范玻色子 W^\pm, Z 和 γ 是 T-even 的, 而新规范玻色子 W_H^\pm, Z_H 和 B_H 则是 T-odd 的。

在 v^2/f^2 量级下, T-odd 规范玻色子 B_H, Z_H 及 W_H 的质量表达式可写为

$$M_{B_H} = \frac{1}{\sqrt{5}} g' f \left[1 - \frac{5v^2}{8f^2} \right] \quad (1)$$

$$M_{Z_H} \approx M_{W_H} = g f \left[1 - \frac{v^2}{8f^2} \right] \quad (2)$$

其中, f 是 LHT 模型的对称性破缺标度, g' 和 g 分别是 SM 中 $U(1)_Y$ 和 $SU(2)_L$ 的规范耦合常数, $v \approx 246$ GeV 为电弱对称性标度。

LHT 模型中的 14 个哥尔斯通玻色子中, 4 个被 T-odd 重规范玻色子 (B_H, Z_H, W_H^\pm) 吃掉, 3 个被 SM 中的 W^\pm, Z 吃掉, 剩余粒子为一个 T-even 双重态 H (可以看成是 SM 中 Higgs 粒子双重态) 和一个 T-odd $SU(2)$ 三重态 ϕ 。双重态 H 的质量和 $SU(2)$ 三重态 ϕ 的质量之间有如下关系

$$M_\phi = \frac{\sqrt{2}}{v} M_H f \quad (3)$$

在 v^2/f^2 量级下, T-odd 费米子 (U_H, D_H) 的质量可以写成

$$M_{U_H} \approx \sqrt{2\kappa} f \left(1 - \frac{v^2}{8f^2} \right) \quad (4)$$

$$M_{D_H} \approx \sqrt{2\kappa} f \quad (5)$$

其中, κ 是 Yukawa 耦合常数。质量最小、中性稳定的 B_H 被看作是非常有吸引力的暗物质候选者^[5,7]。

T-odd 费米子 (T-odd 夸克和 T-odd 轻子) 可通过 T-odd 规范玻色子与 SM 费米子有味改变相互作用。此相互作用可通过 4 个类 CKM 参数化矩阵表示, 两个对于 T-odd 夸克, 两个对于 T-odd 轻子, 分别为 \mathbf{V}_{H_u} 、 \mathbf{V}_{H_d} 、 \mathbf{V}_{H_l} 、 \mathbf{V}_{H_ν} 。它们满足 $\mathbf{V}_{H_u} + \mathbf{V}_{H_d} = \mathbf{V}_{CKM}$, $\mathbf{V}_{H_u} + \mathbf{V}_{H_l} = \mathbf{V}_{PMNS}$ 。LHT 模型为轻子味破坏 (LFV) 提供了一个来自 T-odd 费米子混合所产生的新机制。因此, LHT 模型预言的新粒子能对一些 LFV 过程产生较大贡献, 例如 $l_i \rightarrow l_j \gamma$, $l_i \rightarrow l_j l_k l_l$, $\tau \rightarrow \mu \pi$ 等^[8~9]。

U_H 和 D_H 可能的两体衰变模式为

$$U_H : uB_H \quad cB_H \quad tB_H \quad uZ_H \quad tZ_H \quad dW_H$$

$$D_H : dB_H \quad dZ_H \quad uW_H \quad cW_H \quad tW_H$$

通过具体计算知: U_H 的主要衰变道为 uZ_H 和 dW_H , 而 D_H 的主要衰变道为 dZ_H 和 uW_H 。与计算相关的各粒子间耦合的费曼规则详见文献[10]~[11]。

2 LHT 模型预言的新粒子的产生

2.1 B_H 通过 $e^- \gamma$ 碰撞的产生

B_H 通过 $e^- \gamma$ 碰撞可由过程 $e^- \gamma \rightarrow L^- B_H$ 产生, 该过程的费曼图如图 1 所示。

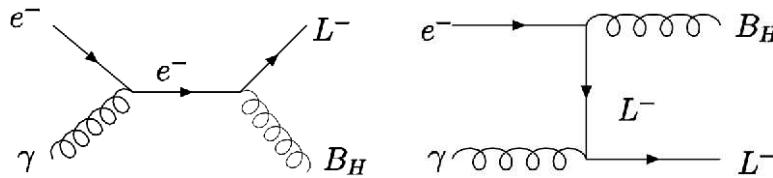


图 1 过程 $e^- \gamma \rightarrow L^- B_H$ 的费曼图

Fig. 1 Feynman diagrams for the process $e^- \gamma \rightarrow L^- B_H$

相应的散射振幅如下

$$M = eYg'Q_L \bar{u}(L) \left[\frac{\epsilon'_2 P_L (P_\gamma + P_e + m_e) \epsilon'_1}{s - m_e^2} + \frac{\epsilon'_1 (P_L - P_\gamma + M_L) \epsilon'_2 P_L}{\hat{u} - M_L^2} \right] u(e) \quad (6)$$

其中, $s = (P_\gamma + P_e)^2 = (P_{B_H} + P_L)^2$, $\hat{u} = (P_L - P_\gamma)^2 = (P_e - P_{B_H})^2$, ϵ'_1 和 ϵ'_2 分别是 γ 和 B_H 的极化矢量, M_L 是 L^- 的质量。

如果 ILC 上的质心能量为 \sqrt{s} , 有效产生截面 $\sigma_1(s)$ 可表示为子过程 $e^- \gamma \rightarrow L^- B_H$ 的产生截面 $\hat{\sigma}(\hat{s})$ 与光子分布函数 $f_{\gamma/e}$ 的卷积

$$\sigma_L(s) = \int_{(M_{B_H} + M_L)^2/s}^{0.83} dx \hat{\sigma}_1(\hat{s}) f_{\gamma/e}(x) \quad (7)$$

其中, $\hat{s} = xs$ 。

计算结果表明在大部分参数空间, 产生截面 $\sigma_1(s)$ 随 f 的增加而减小。当 $500 \text{ GeV} \leq f \leq 2000 \text{ GeV}$ 时, $\sigma_1(s)$ 从 16.4 fb 变化到 1.5 fb 。若假设质心能量为 $\sqrt{s} = 1 \text{ TeV}$ 的 ILC 实验的积分亮度为 $\mathcal{L} = 500 \text{ fb}^{-1}$, 则每年将会产生几百到上万个 B_H 事例^[10]。

如果假设 $M_L = M_{B_H} + 200 \text{ GeV}$, L 主要衰变到 $B_H l$, 其分支比 $Br(L \rightarrow B_H l) \simeq 1$ 。此过程 $e^- \gamma \rightarrow L^- B_H \rightarrow e^- B_H B_H l$ 产生的信号是一个带电轻子和大的能量丢失 ($l + \cancel{E}$)。对于信号 $l + \cancel{E}$ 来说, 最大的背景来自于 SM 过程 $e^- \gamma \rightarrow e^- Z \rightarrow e^- \nu \bar{\nu}$ 和 $e^- \gamma \rightarrow W^- \nu_e \rightarrow l^- \nu \bar{\nu}_e$ 。若对撞机质心能量 \sqrt{s} 远大于 Z 粒子质量, 过程 $e^- \gamma \rightarrow e^- Z$ 中产生的电子能量近似为 $E_e = \sqrt{s}/2$, 因此很容易把该背景与信号区分开。所以主要的背景是 $e^- \gamma \rightarrow W^- \nu_e \rightarrow l^- \nu \bar{\nu}_e$ 。为了讨论在未来的 ILC 实验上能否通过过程 $e^- \gamma \rightarrow L^- B_H$ 探测

LHT的可能信号,进一步计算了信号与背景平方根的比值($R_L = N_L / \sqrt{B}$)。其中假定 ILC 具有质心能量 $\sqrt{s}=1$ TeV, 年积分亮度 $\mathcal{L}=500 fb^{-1}$ 。计算结果表明只要 $g' \geq 0.2$ 且 $M_{B_H} \leq 200$ GeV, R_L 值就大于2。因此期望 LHT 模型的可能信号可通过 $e^- \gamma$ 碰撞在将来 ILC 实验中探测到。

2.2 T-odd 规范玻色子 B_H 、T-odd 夸克在 THERA 上的产生

2.2.1 B_H 通过 γq 碰撞产生

与过程 $e^- \gamma \rightarrow L^- B_H$ 相似,在 THERA 对撞机上新规范玻色子 B_H 可通过 s -道和 t -道两种模式产生,该过程的费曼图如图2所示。子过程 $\gamma q \rightarrow B_H Q (q = u, c, d, s)$ 的散射幅可以写为

$$M = eg' Q_Q \bar{u}(L) \left[\frac{\not{\epsilon}_2 P_Q (\not{P}_\gamma + \not{P}_q + m_q) \not{\epsilon}_1}{\hat{s} - m_q^2} + \frac{\not{\epsilon}_1 (\not{P}_Q - \not{P}_\gamma + m_L) \not{\epsilon}_2 P_Q}{\hat{u} - m_Q^2} \right] u(q) \quad (8)$$

其中, $\hat{s}(P_\gamma + P_q)^2 = (P_{B_H} + P_Q)^2$, $\hat{u}(P_Q - P_\gamma)^2 = (P_q - P_{B_H})^2$ 。

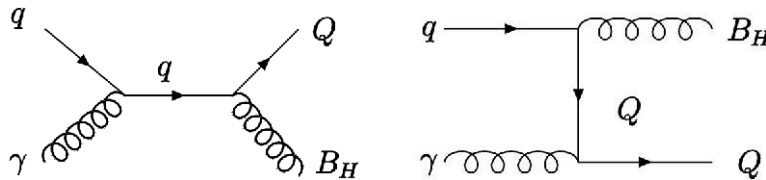


图2 过程 $\gamma q \rightarrow B_H Q$ 的费曼图

Fig. 2 Feynman diagrams for the process $\gamma q \rightarrow B_H Q$

$B_H Q$ 的总产生截面 $\sigma_Q(s)$ 可表示为子过程 $\gamma q \rightarrow B_H Q$ 的截面 $\hat{\sigma}_i(\hat{s})$ 与部分子分布函数的卷积

$$\sigma_Q(s) = \sum_i \int_{\tau_{\min}}^{0.83} d\tau \int_{\tau/0.83}^1 \frac{dx}{x} f_{\gamma/e} \left(\frac{\tau}{x} \right) f_{i/p}(x) \hat{\sigma}_i(\hat{s}) \quad (9)$$

其中, $\hat{s} = \tau s$, $\tau_{\min} = \frac{(M_{B_H} + M_Q)^2}{s}$, $i = u, c, d$ 和 s , $f_{\gamma/e}$ 为高能光子的分布函数^[12]。在计算中对 $f_{i/p}(x)$ 选取CTEQ6L部分子分布函数^[12]。

计算结果表明当 $500 \text{ GeV} \leq f \leq 2000 \text{ GeV}$, σ_Q 在 $14.6 \sim 2.4 \times 10^{-3} fb$ 之间,对于 $\sqrt{s}=1$ TeV, $\mathcal{L}=470 fb^{-1}$ 的 THERA 实验,每年将会产生几个到几百个 $B_H Q$ 事例^[11]。

T-odd 夸克 Q_H 主要衰变为 $B_H q (q = u, c, d, \text{或} s)$,其分支比 $Br(Q \rightarrow B_H q) \ll 1$ 。因此,在 THERA 对撞机上 $B_H Q$ 的产生信号是一喷注和大的能量丢失($jet + \cancel{E}$)。而信号 $jet + \cancel{E}$ 的背景主要来自 SM 子过程 $\gamma q \rightarrow Z q$ 和 $Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$ 。选取耦合参数 g' 的三个不同值,绘制了比值 $R_Q = N_Q / \sqrt{B}$ 随 B_H 质量 M_{B_H} 的变化曲线^[10]。发现在 g' 和 M_{B_H} 的大部分参数空间, R_Q 值很大。只要 $g' > 0.1$, $M_{B_H} \leq 190$ GeV, R_Q 大于2。因此期待在未来的 THERA 实验中,可能通过子过程 $\gamma q \rightarrow B_H Q$ 探测到新规范玻色子 B_H 产生的物理信号。

2.2.2 Q_H 通过 ep 碰撞产生

Q_H 可通过 ep 碰撞由过程 $ep \rightarrow \nu_H Q_H$ 产生,该过程的费曼图如图3所示。相应的散射振幅如下

$$M_q^j = \frac{e^2}{2S_W^2} \frac{V_{ij}(V_{H_l})_{li}}{K^2 - M_{W_H}^2} [\bar{u}(P_4) \gamma_\nu P_L u(P_2)] [\bar{u}(P_3) \gamma^\nu P_L u(P_1)] \quad (10)$$

其中, $K^2 = (P_4 - P_2)^2$, q 指 SM 中的 u, c, d 或 s , ij 指 T-odd 夸克代数,取 $ij = 1, 2$,有效产生截面 $\sigma_q(s)$ 可以表示为子过程 $e(P_1)q(P_2) \rightarrow \nu_H^j(P_3)Q_H^j(P_4)$ 的产生截面 $\hat{\sigma}_q^j(\hat{s})$ 与夸克分布函数 $f_{q/p}$ 的卷积

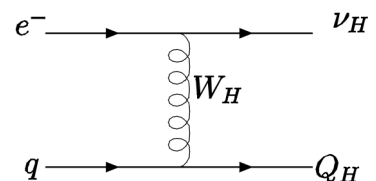


图3 过程 $ep \rightarrow \nu_H Q_H$ 的费曼图

Fig. 3 Feynman diagram for the process $ep \rightarrow \nu_H Q_H$

$$\sigma_q(s) = \sum_{ij} \sum_q \int_{x_{\min}}^1 f_{q,b}(x, \mu_F) \hat{\sigma}_q^{ij}(\hat{s}) dx \quad (11)$$

其中, $x_{\min} = (M_b + M_{Q_H})^2/s$, $\hat{s} = xs$, M_b 是 T-odd 中微子 ν_H 的质量。计算中采用 CTEQ6L PDF 夸克分布函数, 同时假设标度因子 μ_F 在 \sqrt{s} 量级。

计算结果表明当 $M_b = 300 \text{ GeV}$, $\kappa = 1.0$, $500 \text{ GeV} \leq f \leq 2000 \text{ GeV}$ 时, $\sigma_q(s)$ 在 $51.2 \sim 3.4 \times 10^{-4} \text{ pb}$ 之间变化。

当 $\kappa > 0.5$ 时, T-odd 夸克主要衰变到一个 T-odd 规范玻色子和一个普通的费米子。下面分四种情况进行讨论:

1) 对于衰变道 $\nu_H U_H \rightarrow \nu_H u B_H$ 、 $\nu_H c B_H$ 和 $\nu_H D_H \rightarrow \nu_H d B_H$, 上述过程产生的信号为一喷注和大的能量丢失 ($jet + \cancel{E}$)。计算发现, 当 $M_b = 200 \text{ GeV}$, $\kappa = 1.0$ 且 $f \geq 500 \text{ GeV}$ 时, σ 能够达到 5.2 pb 。为了考察信号 $jet + \cancel{E}$ 能否在 $\sqrt{s} = 3.7 \text{ TeV}$, $\mathcal{L} = 4 \text{ fb}^{-1}$ 的 THERA 实验中被探测到, 进一步计算了 R_{Q_H} , 发现当 $\kappa = 0.8$, $500 \text{ GeV} \leq f \leq 2000 \text{ GeV}$ 时, R_{Q_H} 在 $196 \sim 2.9$ 之间。因此在合适的参数空间内, 可以在 THERA 上探测到过程 $ep \rightarrow \nu_H B_H + x$ 产生的物理信号。

2) 对于衰变道 $U_H \rightarrow t B_H$, $ep \rightarrow \nu_H U_H + X$, 上述过程产生的信号仅仅是一个单独 top 夸克和大的能量丢失 ($t + \cancel{E}$), 它的产生几率只有 1 fb 而不能在 THERA 实验中被探测到。类似于过程 $U_H \rightarrow t B_H$, 过程 $U_H \rightarrow t Z_H$ 产生的信号也不能被探测到。

3) 对于 T-odd 夸克衰变到 Z_H 和一个普通费米子, 衰变过程产生的信号均为一喷注和一巨大的能量丢失 ($jet + \cancel{E}$)。当 $M_b = 300 \text{ GeV}$, $\kappa = 1.0$, $500 \text{ GeV} \leq f \leq 2000 \text{ GeV}$ 时, 在 THERA 上将会产生上万个信号事例。

4) 考虑到 T-odd 夸克衰变到一个 W_H 和一个普通的费米子, 这些过程产生的信号为一喷注、一轻子和大的能量丢失 ($jet + l + \cancel{E}$)。计算表明信号 $jet + l + \cancel{E}$ 产生的几率比信号 $jet + \cancel{E}$ 的产生几率小。但是当 $M_b = 300 \text{ GeV}$, $\kappa = 0.8$, $f \geq 1500 \text{ GeV}$ 时, 它的值可能达到 14.3 pb 。在合理的参数空间, THERA 上每年将会产生几十甚至是几千个 W_{Hq} 事例。

2.3 重轻子对在 ILC 上的产生

ILC 上重轻子对可通过过程 $e^+ e^- \rightarrow \bar{L}_i L_j$ 产生, 该过程的费曼图如图 4 所示。

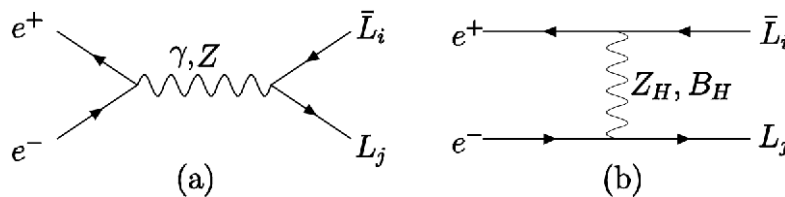


图 4 过程 $e^+ e^- \rightarrow \bar{L}_i L_j$ 的费曼图

Fig. 4 Feynman diagrams for the process $e^+ e^- \rightarrow \bar{L}_i L_j$

经过计算发现当 $M_L = 400 \text{ GeV}$, $500 \text{ GeV} \leq f \leq 2000 \text{ GeV}$ 时, $\sigma(\bar{L}_u L_u)$ 和 $\sigma(\bar{L}_e L_e)$ 的值分别在 $93.1 \sim 31 \text{ fb}$ 和 $171.5 \sim 33.5 \text{ fb}$ 之间变化。当 $M_L = 800 \text{ GeV}$, $500 \text{ GeV} \leq f \leq 2000 \text{ GeV}$ 时, 它们的值分别为 $37.7 \sim 24.3 \text{ fb}$ 和 $55.2 \sim 25.8 \text{ fb}$ 。当 $\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$, $\mathcal{L} = 100 \text{ fb}^{-1}$ 且 $M_L < 900 \text{ GeV}$, $f \leq 2 \text{ TeV}$ 时, 在 ILC 上每年将会产生几百甚至几千个 $\bar{L}_u L_u$ 和 $\bar{L}_e L_e$ 事例^[11]。

考虑到 T-odd 轻子 L_i 主要衰变到 $B_H l_i (l_i = e, u, \tau)$ 且 $Br(L_i \rightarrow B_H l_i) \ll 1$ 。此时过程 $e^+ e^- \rightarrow \bar{L}_u L_u \rightarrow \bar{u} u + B_H B_H$ 产生的信号是同味的相反轻子 $\bar{u} u$ 和大的能量丢失 ($\bar{u} u + \cancel{E}$)。大的横向丢失能量可以用来区分 SM 中 $e^+ e^- \rightarrow \gamma/z \rightarrow \bar{u} u$ 产生的巨大背景, 因此可以很容易的从 SM 背景中将 $\bar{u} u + B_H B_H$ 信号区分出来。因此只要 T-odd 轻子质量不是很大, 它就会在将来的 ILC 实验中被探测到。

LFV 过程 $e^+e^- \rightarrow \bar{L}_e L_u$ 产生一对相反符号、不同味道的轻子和大的丢失能量 ($\bar{e}u + \cancel{E}_T$)。例如： $e^+e^- \rightarrow \bar{L}_e L_u \rightarrow \bar{e}\mu B_H B_H$ 。尽管 LFV 信号十分引人注目，但它不是背景自由的。其 SM 背景主要来自于过程 $e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow \bar{e}\mu\nu_e\bar{\nu}_\mu$ 。进一步计算信噪比 R_L ，发现当 $\mathcal{L} = 100 fb^{-1}$ ， $\sqrt{s} = 2 TeV$ 且 $Br(W^+ \rightarrow \bar{e}\nu_e) = (10.66 \pm 0.17)\%$ 、 $Br(W^- \rightarrow \mu\bar{\nu}_\mu) = (10.60 \pm 0.15)\%$ [13]，在大部分 LHT 模型参数空间内， R_L 的值大于 33。当然，通过合理的截断可使此背景降低。因此，在未来 ILC 上能够很容易探测到 LFV 过程 $e^+e^- \rightarrow \bar{L}_e L_u$ 产生的信号。

2.4 T-odd 标量量子和新规范玻色子在 LHC 上的联合产生

LHC 上 T-odd 标量粒子可通过如下过程产生

$$\begin{aligned} q\bar{q} &\rightarrow \phi^0 Z_H & q\bar{q} &\rightarrow \phi^0 B_H & q\bar{q} &\rightarrow \phi^- W_H^+ \\ q\bar{q}' &\rightarrow \phi^P W_H^\pm & q\bar{q}' &\rightarrow \phi^+ Z_H & q\bar{q}' &\rightarrow \phi^+ B_H \end{aligned}$$

其中， $q\bar{q} \rightarrow \phi V_H (V_H = Z_H, B_H, W_H)$ 只能以 SM 规范玻色子 (γ 或 Z) 作为传播子通过 s 道产生。而 $q\bar{q}' \rightarrow \phi V_H$ 在 s 道中以 W^\pm 作为传播子， t 道则以 T-odd 费米子 q_- 作为传播子。该过程的费曼图如图 5 所示。

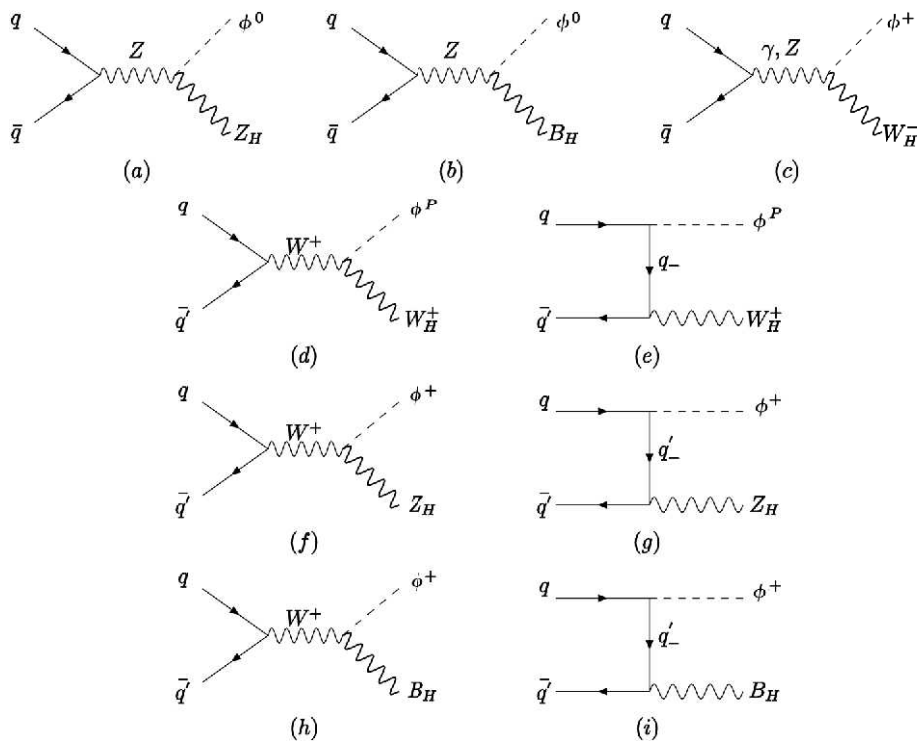


图 5 LHC 上产生新标量粒子过程的费曼图

Fig.5 Feynman diagrams for the production processes of new scalar particles in LHC

计算结果表明，在 LHT 模型的大部分参数空间，以上过程的产生截面都很小。而对于 $q\bar{q}' \rightarrow \phi^+ B_H$ 而言，当 $500 GeV \leq f \leq 800 GeV$ 时，它的产生截面值在 $1.014 \sim 0.024 fb$ 之间。若假设 $\mathcal{L} = 300 fb^{-1}$ ，LHC 上每年将会产生几个到几百个 $\phi^+ B_H$ 事例。考虑到 ϕ^+ 衰变到 $W^+ B_H$ 的分支比 $Br(\phi^+ \rightarrow W^+ B_H) \ll 1$ 。如果假设 W^+ 以轻子的形式衰变， $q\bar{q}' \rightarrow \phi^+ B_H$ 产生的信号是一个带电轻子和大的能量丢失 ($l^+ + \cancel{E}$)。因此，只要 $f \leq 800 GeV$ ，过程 $q\bar{q}' \rightarrow \phi^+ B_H$ 在 LHC 上每年将会产生几十个 $l^+ + \cancel{E}$ 事例。

3 结论

本文通过 ILC 和 THERA 上的 $e\gamma$ 、 ep 对撞,研究了 LHT 模型预言的新规范玻色子 B_H 通过过程 $e^+e^- \rightarrow e^-\gamma \rightarrow L^-B_H$ 和 $ep \rightarrow \gamma q \rightarrow B_H Q$ 的产生。具体计算了这两个过程的产生截面 σ_L 和 σ_Q ,分析了这两个过程的信号和背景并计算了信噪比 R_L 和 R_Q 。结果表明以上两过程的截面和信噪比都很大,在未来的 ILC 和 THERA 上可以通过过程 $e^+e^- \rightarrow e^-\gamma \rightarrow L^-B_H$ 和过程 $ep \rightarrow \gamma q \rightarrow B_H Q$ 来检验 LHT 模型。

然后讨论了 ILC 上通过过程 $e^+e^- \rightarrow \bar{L}_i L_j$ 重轻子对的产生。根据计算结果,发现只要 T-odd 轻子不是很重,每年在 ILC 上就可以产生大量的 $\bar{L}_i L_j$ 事例。

最后讨论了在 LHC 上 T-odd 标量子和新规范玻色子的联合产生,发现在 LHT 模型大部分参数空间内,大部分过程的产生截面都很小。而对于过程 $q\bar{q} \rightarrow \phi^+ B_H$,当 $500 \text{ GeV} \leq f \leq 800 \text{ GeV}$ 时,它的产生截面值在 $1.014 \sim 0.024 \text{ fb}$ 范围。若假设 LHC 的年积分亮度为 300 fb^{-1} ,则每年可在 LHC 上产生几个甚至几百个 $\phi^+ B_H$ 事件。

总之,本文研究了 LHT 模型预言的新粒子在能对撞机上可能的产生,并讨论了其可观测的物理迹象。相信该研究结论能为将来高能对撞机探测这些粒子、检验 LHT 模型提供理论依据。

[参考文献] (References)

- [1] ARKANI-HAMED N, COHEN A G, GEORGI H. Electroweak symmetry breaking from dimensional deconstruction [J]. Phys. Lett., 2001, B513: 232~240.
- [2] SCHMALTZ M, TUCKER S D. Little Higgs review[J]. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 2005, 55: 299~345.
- [3] ARKANI-HAMED N, COHEN A G, KATZ E, et al. The littlest Higgs[J]. JHEP, 2002, 0207: 034-1~034-14.
- [4] CHENG H C, LOW I. TeV Symmetry and the Little Hierarchy Problem[J]. JHEP, 2003, 0309: 051-1~051-13.
- [5] HUBISZ J, MEADE P. Phenomenology of the littlest Higgs with t-parity[J]. Phys. Rev., 2005, D71: 035016.
- [6] HAN T, LOGAN H E, WANG L T. Smoking-gun signatures of little Higgs models[J]. JHEP, 2006, 0601: 099-1~099-52.
- [7] ASANO M, MATSUMOTO S, OKADA N, et al. Cosmic positron signature from dark matter in the littlest Higgs model with T-parity[J]. arXiv: hep-ph/0602157v1.
- [8] CHOUDHURY S R, CORNELL A S, DEANDREA A, et al. Lepton flavour violation in the little Higgs model[J]. Phys. Rev., 2006, D75: 055011.
- [9] BLANKE M, BURAS A J. A guide to flavour changing neutral currents in the littlest Higgs model with T-parity[J]. arXiv: hep-ph/0703117v1.
- [10] YUE C X, YANG S, WANG L N. Signals of the littlest Higgs model with T-parity at e gamma and ep collisions[J]. arXiv: hep-ph/0610005v1.
- [11] TELNOV V I. Problems of obtaining gamma gamma and gamma epsilon colliding beams at linear colliders[J]. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec., 1990, A294: 72~125.
- [12] PUMPLIN J, STUMP D R, HUSTON J, et al. New generation of parton distributions with uncertainties from global QCD analysis[J]. JHEP, 2002, 0207: 012-1~012-41.
- [13] YUE C X, ZHANG N, ZHU S H. Pair production of the heavy leptons in future high energy linear e^+e^- colliders [J]. Eur. Phys. J., 2008, C53: 215~219.