

单个类矢量 B 夸克在紧凑型线性对撞机上通过 bZ 衰变道的产生

崔小敏^a, 李亚桢^b, 王奕戈^b, 刘要北^a

(河南科技学院 a.机电学院; b.数学科学学院, 河南 新乡 453000)

摘要:许多超出标准模型的新物理都预测了新的类矢量夸克.它们会在高能对撞机上产生独特的信号.基于模型无关的框架,研究了单态的类矢量 B 夸克在质心能量为 3 TeV 的紧凑型线性对撞机上的单个产生过程.重点研究 $e^+e^- \rightarrow B\bar{b} \rightarrow Zb\bar{b}$ 过程以及 Z 玻色子两种衰变道($Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ 和 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$)的末态信号.通过对信号和标准模型背景的分析,分别给出了在年积分亮度为 5 ab^{-1} 下对 B 夸克质量和耦合参数的排除限制和发现范围.数值结果表明,未来的高能量线性对撞机可以作为探测类矢量 B 夸克的电弱耦合的理想场所.

关键词:类矢量夸克;紧凑型线性对撞机;产生截面

中图分类号: O572.22

文献标志码: A

为了解决规范等级问题,许多超出标准模型的新物理理论都预测类矢量夸克的存在从而抵消希格斯玻色子的质量平方发散,例如小希格斯模型、额外维度和复合希格斯模型等^[1].这些新粒子是复合三重态自旋 1/2 费米子,在标准模型的电弱对称群下,它们的左右手分量具有相同的变换性质.类矢量夸克的电荷可以是 $+(2/3)e$ (T 夸克), $-(1/3)e$ (B 夸克), $+(5/3)e$ (X 夸克) 或 $-(4/3)e$ (Y 夸克).它们可能出现在电弱单态 $[B, Y]$, 电弱双重态 $[(X, T), (T, B)$ 或 $(B, Y)]$ 或电弱三重态 $[(X, T, B)$ 或 $(T, B, Y)]$ 中.这些新费米子的一个共同特征是可以衰变为一个标准模型夸克和一个规范玻色子,或一个希格斯玻色子.它们会在当前和未来的高能对撞机中产生典型的信号^[2-3].本文重点关注电弱单态的类矢量 B 夸克(Vector-Like B -quark, VLQ- B),且它仅与第三代标准模型夸克存在耦合的情况.

在大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)实验上,ATLAS 和 CMS 合作组分别在 13 TeV 的 LHC 上通过对产生过程对 VLQ- B 进行了寻找,并在 95% 的置信水平(Confidence Level, CL)上给出了 VLQ- B 质量的限制.例如,CMS 合作组通过包含单轻子、双轻子和多轻子末态信号探测了 VLQ- B 的所有衰变模式,在 $910 \sim 1\,240 \text{ GeV}$ ^[4] 范围内给出了质量的限制.最近,CMS 合作组通过 VLQ- B 成对产生过程对完全强子末态信号进行了寻找,分别给出了 $B \rightarrow tZ$ 和 $B \rightarrow th$ 衰变分支比为 100% 时对质量的限制为 $1\,570$ 和 $1\,390 \text{ GeV}$ ^[5].此外,ATLAS 合作组综合了多个末态信号的测量结果,在 95% CL 给出了 VLQ- B 在电弱单态、电弱双重态 (T, B) 和 (B, Y) 情形时的质量限制分别为 $1\,220$ 、 $1\,370$ 和 $1\,140 \text{ GeV}$ ^[6].

到目前为止,关于 VLQ- B 信号的寻找大多都集中在强子对撞机上.与强子对撞机相比,未来的线性对撞机具有特别清晰的背景环境^[7].如紧凑型线性对撞机(Compact Linear Collider, CLIC)最后阶段的质心能量将达到 3 TeV,可以直接通过单个产生过程寻找较大质量的类矢量夸克.因此,高能线性对撞机可以精确测量新的类矢量夸克的性质并检验不同的新物理模型^[8-10].本文将主要关注单个 VLQ- B 在 CLIC 上通过 $e^+e^- \rightarrow B\bar{b}$ 的产生过程,并通过 $B \rightarrow bZ$ 衰变道以及 Z 玻色子的两个衰变道 $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ 和 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 所产生的末态信号.

收稿日期:2022-06-15;修回日期:2022-07-13.

基金项目:国家自然科学基金(12275067);河南省自然科学基金(222300420443);河南省高等学校重点科研项目(22A140019).

作者简介:崔小敏(1981-),女,河南焦作人,河南科技学院讲师,研究方向为高能物理,E-mail:cuixiaomin@hist.edu.cn.

通信作者:刘要北(1980-),男,河南禹州人,河南科技学院教授,博士,研究方向为超出标准模型的新物理,E-mail:liuyaobei@hist.edu.cn.

1 模型框架

如果只考虑 $SU(2)$ 单态的 VLQ- B 与第三代夸克存在耦合的情况, 参数化后的拉格朗日量

$$\mathcal{L} = \kappa_B \left\{ \frac{g}{2} [\bar{B}_L W_\mu^- \gamma^\mu t_L] + \frac{g}{2\sqrt{2} \cos \theta_w} [\bar{B}_L Z_\mu \gamma^\mu b_L] - \frac{M_g}{\nu} [\bar{B}_R H b_L] - \frac{m_b}{\nu} [\bar{B}_L H b_R] \right\} + h.c.,$$

其中, g 是 $SU(2)_L$ 规范耦合常数, θ_w 是温伯格角, ν 是真空期望值, 因此该理论只有两个自由参数: VLQ- B 质量 M_B 和耦合强度 κ_B . 最近, 文献[11]拟合了 ATLAS 和 CMS 实验组对单个类矢量夸克产生过程的数据并给出了对耦合强度参数和各种类矢量夸克的质量的限制, 如对于仅与第三代夸克有耦合的 VLQ- B , 当 $M_B \leq 2$ TeV 时, $\kappa_B \leq 1.0$. 本文采取的参数空间为: $\kappa_B \leq 0.6$, $M_B \leq 1\ 200$ GeV. 需要指出的是, 由于受具体模型的影响, 本文并未考虑电弱精确测量对耦合强度参数的限制.

利用高能物理软件包 MadGraph5-aMC@NLO^[12] 对 $e^+e^- \rightarrow B\bar{b}(b\bar{B})$ 过程的产生截面进行计算, 相关的标准模型输入参数为^[13]: $\sin^2 \theta_w = 0.231$, $\alpha_e = 1/128$, $m_z = 91.187\ 6$ GeV, $m_b = 4.18$ GeV.

由图 1 可知随着 VLQ- B 质量的增大, 产生截面随着相空间变大而减小. 当 $\kappa_B = 0.3$ 和 $M_B = 2\ 000$ GeV 时, 产生截面可以达到 0.28 fb. 显然, 对于固定的 VLQ- B 质量和质心能量, 该过程的产生截面与耦合强度 κ_B 的平方成正比.

2 对撞机模拟与分析

从上可知 VLQ- B 可以在直线对撞机上与标准模型中的底夸克协同产生. 图 2 给出了上述过程通过 $B \rightarrow bZ$ 衰变的费曼图. 考虑到随后 Z 玻色子的 2 种衰变模式: 轻子衰变道 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$, 以及中微子衰变道 $Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$. 该过程有两个典型的末态信号, 分别为 $2b2\ell$ 和 $2b + E_T$.

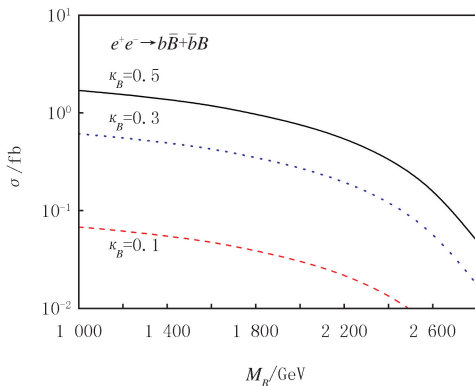


图1 κ_B 取3个特殊值时, 产生截面随质量 M_B 的变化曲线

Fig.1 Total cross sections as a function of M_B with three typical values of κ_B

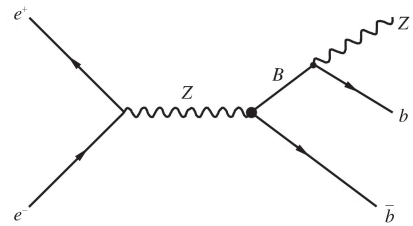


图2 过程 $e^+e^- \rightarrow B(-Zb)\bar{b}$ 的费曼图

Fig.2 Representative Feynman diagrams of the processes $e^+e^- \rightarrow B(-Zb)\bar{b}$

在产生信号和标准模型背景的蒙特卡洛事件时, 模拟的事例数通过 Pythia8.20^[14] 进行部分子碎裂和强子化, 并使用 Delphes3.4.2^[15] 进行探测器模拟, 其中 CLIC 上的 delphes_card 用作探测器参数, 底夸克喷注标记的效率为 70%. 最后, 使用 MadAnalysis5 软件包^[16] 对信号和背景事例进行分析.

2.1 衰变道 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ 的分析

通过衰变道 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ ($\ell = e, \mu$) 分析该过程的末态信号

$$e^+ e^- \rightarrow B\bar{b} \rightarrow Zb\bar{b} \rightarrow \ell^+ \ell^- b\bar{b}.$$

对于该过程, 典型的信号是两个 b -jet 和一对带相反电荷的同味轻子. 主要的标准模型背景来自过程: $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\ell^+\ell^-$ 和 $e^+e^- \rightarrow jj\ell^+\ell^-$. 由于经过截断后截面被严重压低, 这里不再考虑其他标准模型背景过程, 如 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ 和 $e^+e^- \rightarrow ZW^+W^-$ 等.

为了识别对象, 对信号和标准模型背景在部分子水平采用以下基本截断

$$p_T^\ell > 15 \text{ GeV}, p_T^{j/b} > 25 \text{ GeV}, |\eta_j| < 2.5, \Delta R > 0.4,$$

其中, $\Delta R = \sqrt{\Delta\Phi^2 + \Delta\eta^2}$ 表示速度方位角平面上的分离度, $p_T^{\ell,b,j}$ 是轻子, b -jet 和轻 jet 的横向动量, η 表示赝快度。

对于该过程的末态信号, ℓ_1 和 ℓ_2 是来自 Z 玻色子衰变产生的两个同味且电荷相反的轻子, 并且至少存在两个 b -jet. 与其他标准模型背景事例数的分布不同, 信号中来自较大质量的类矢量 B 夸克衰变产物具有较大的横向动量, 且一对来自 Z 玻色子衰变的轻子应该满足其不变质量分布, 另外类矢量 B 夸克的衰变产物的不变质量分布应该在较大质量区域. 因此, 根据信号和背景不同的运动学分布, 将采取以下几组截断。

Cut-1: 只有两个轻子和两个 b -jet, 且 b -jet 的横动量和分离度需满足 $P_T^{b_1} > 400 \text{ GeV}, P_T^{b_2} > 200 \text{ GeV}$ 与 $\Delta R_{b_1, b_2} > 2.5$. 此外, 来自 Z 玻色子衰变的两个同味轻子还必须满足 $p_T^{\ell_1 \ell_2} > 200 \text{ GeV}$ 与 $\Delta R_{\ell_1 \ell_2} < 1$.

Cut-2: Z 玻色子不变质量要求满足 $|M_{\ell_1 \ell_2} - m_Z| < 10 \text{ GeV}$.

Cut-3: VLQ- B 夸克不变质量要求满足 $M_{b_1 \ell_1 \ell_2} > 1000 \text{ GeV}$.

标准模型的背景在施加上述截断后被大大削减, 最大的背景事例来自于过程 $e^+ e^- \rightarrow b\bar{b} \ell^+ \ell^-$, 其产生截面为 1.92 ab (见表 1)。

表 1 当 $\kappa_B = 0.3$ 时, 施加各截断后通过 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ 衰变道的信号和标准模型背景的产生截面

Tab. 1 Cut flow of the cross sections for the signals via the decay channel

$Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ and SM backgrounds with $\kappa_B = 0.3$

ab

截断	信号			背景	
	1 200 GeV	1 500 GeV	2 000 GeV	$\ell^+ \ell^- b\bar{b}$	$\ell^+ \ell^- jj$
Basic	4.59	2.79	0.72	3 627	10 480
Cut 1	1.76	1.04	0.24	2.84	0.050
Cut 2	1.35	0.91	0.21	2.48	0.043
Cut 3	1.22	0.72	0.18	1.92	0.027

2.2 衰变道 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 的分析

通过 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 衰变道来分析信号该过程的末态信号 $e^+ e^- \rightarrow B\bar{B} \rightarrow Zb\bar{b} \rightarrow b\bar{b} + E_T$. 对于该过程, 主要的标准模型背景来自过程 $e^+ e^- \rightarrow \nu\bar{\nu} b\bar{b}$ 和 $e^+ e^- \rightarrow \nu\bar{\nu} jj$. 对于该信号的事例, 来自较大质量的类矢量 B 夸克衰变的 Z 玻色子将具有较大的横向丢失能量, 且横向质量分布会集中在较大值区域. 根据这些运动学分布, 采取的截断如下。

Cut-a: 横向丢失能量满足 $E_T > 300 \text{ GeV}$.

Cut-b: 至少有两个 b -jet, 没有任何轻子 ($N(\ell) = 0$), 且两个 b -jet 横向动量和分离度需要满足 $P_T^{b_1} > 400 \text{ GeV}, P_T^{b_2} > 200 \text{ GeV}$ 和 $\Delta R_{b_1, b_2} > 2.5$.

Cut-c: B 夸克的横向质量需要满足 $M_T(b_1) > 1000 \text{ GeV}$.

从表 2 可以看出, 施加上述截断后信号的事例数被有效保留, 最大的背景事例来自 $e^+ e^- \rightarrow \nu\bar{\nu} b\bar{b}$ 过程, 且产生截面约为 17.4 ab .

表 2 当 $\kappa_B = 0.3$ 时, 施加各截断后通过 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 信号和标准模型背景的产生截面

Tab. 2 Cut flow of the cross sections for the signals via the decay channel

$Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ and SM backgrounds with $\kappa_B = 0.3$

ab

截断	信号			背景	
	1 200 GeV	1 500 GeV	2 000 GeV	$\nu\bar{\nu} b\bar{b}$	$\nu\bar{\nu} jj$
Basic	26.64	22.02	12.83	281 000	414 300
Cut a	18.72	17.05	10.76	31 753	1 533
Cut b	7.02	5.72	2.79	28.00	0.12
Cut c	6.12	5.04	2.56	17.40	0.08

2.3 信号统计显著度

为了研究探测的灵敏度,使用信号显著性公式

$$Z_{\text{disc}} = \sqrt{2[(s+b)\ln(1+s/b) - s]} \geq 5, Z_{\text{excl}} = \sqrt{2[s - b\ln(1+s/b)]} \leq 2.$$

它们分别表示 5σ 的发现区域以及 2σ 的排除区域.其中, s 和 b 代表截断后的信号和标准模型背景的事例数,其在数值上等于产生截面与年积分亮度的乘积,这里年积分亮度取 5 ab^{-1} .为了预估在 CLIC 上寻找 VLQ- B 的可能性,本文没有考虑系统误差及初末态韧致辐射效应的影响.

图 3 和图 4 分别给出了 2σ 和 5σ 上耦合强度 κ_B 与 VLQ- B 质量 M_B 的变化曲线,其中对撞机的年积分亮度取 5 ab^{-1} .图 3 用点线给出了文献[11]中 LHC 实验在 95% CL 上对参数空间的限制.1)由于经过截断后保留了更多的事例数,衰变道 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 比衰变道 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ 具有更好的显著性.2)对于衰变道 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ 和 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 来说,VLQ- B 在 2σ 的排除区域分别为: $\kappa_B \in [0.18, 0.6], M_B \in [1\ 200, 2\ 200] \text{ GeV}$ 以及 $\kappa_B \in [0.12, 0.4], M_B \in [1\ 200, 2\ 500] \text{ GeV}$.3)衰变道 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ 和 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 的排除范围均优于目前的实验限制.4)衰变道 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ 和 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 在 5σ 上的发现范围分别为: $\kappa_B \in [0.28, 0.6], M_B \in [1\ 200, 1\ 900] \text{ GeV}$ 以及 $\kappa_B \in [0.2, 0.6], M_B \in [1\ 200, 2\ 450] \text{ GeV}$.因此,在未来质心能量为 3 TeV 的 CLIC 上,类矢量 B 夸克通过 $e^+ e^- \rightarrow B(\rightarrow Zb)\bar{b}$ 过程以及衰变道 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 更容易被探测到.

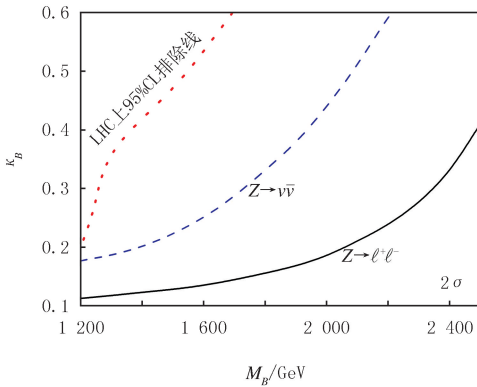


图3 年积分亮度为 5 ab^{-1} 时,模型参数 κ_B - M_B 在 2σ 上的排除限制,其中点线表示来自文献[11]中的LHC实验的限制

Fig.3 2σ exclusion limit contour plots for the signal in κ_B - M_B planes with the integral luminosity of 5 ab^{-1} , where the dotted line represents the LHC limits in Ref. [11]

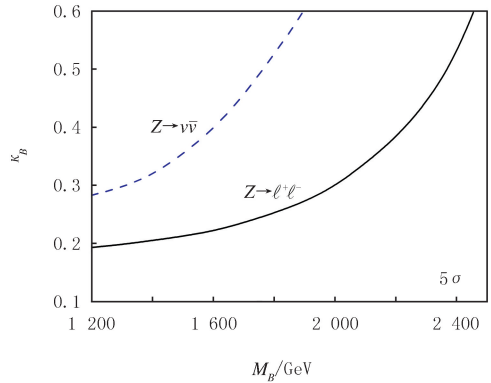


图4 年积分亮度为 5 ab^{-1} 时,在 5σ 上 κ_B - M_B 的发现范围

Fig.4 5σ discovery prospect contour plots for the signal in κ_B - M_B planes with the integral luminosity of 5 ab^{-1}

3 结 论

在模型无关的框架下,本文通过 $e^+ e^- \rightarrow Bb \rightarrow Zb\bar{b}$ 过程研究了电弱单态的类矢量 B 夸克在未来质心能量为 3 TeV 的 CLIC 上被探测的可能性.该模型框架包含两个自由参数,分别为类矢量 B 夸克的质量 M_B 和耦合强度参数 κ_B .通过对 $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$ ($\ell = e, \mu$) 和 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 这两个衰变道的信号及其标准模型背景的分析,得到了积分亮度为 5 ab^{-1} 时模型参数的发现范围和排除限制.数值结果表明衰变道 $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ 具有更好的显著性.因此,在未来质心能量为 3 TeV 的高能直线对撞机上可以通过上述过程观测类矢量 B 夸克的信号并验证其耦合特性,从而为实验上发现新物理提供一个很好的途径.

参 考 文 献

[1] 何红建,邝宇平.探索上帝粒子与质量起源[J].物理,2014,43(1):12-24.
HE H J, KUANG Y P. God particle and origin of mass[J]. Physics, 2014, 43(1): 12-24.
[2] 高原宁.大型强子对撞机上的实验进展[J].物理,2019,48(5):273-276.
GAO Y N. Status of the LHC experiments[J]. Physics, 2019, 48(5): 273-276.

- [3] 沈成平,方亚泉,阮曼奇.对撞机实验上的粒子物理研究[J].辽宁师范大学学报(自然科学版),2018,41(3):296-304.
SHEN C P,FANG Y Q,RUAN M Q.Research on particle physics in collider experiments[J].Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition),2018,41(3):296-304.
- [4] CMS Collaboration.Search for vector-like T and B quark pairs in final states with leptons at $\sqrt{s}=13$ TeV[J].JHEP,2018,8:177.
- [5] CMS Collaboration.Search for pair production of vectorlike quarks in the fully hadronic final state[J].Physical Review D,2019,100:072001.
- [6] AABOUD M,AAD G,ABBOTT B,et al.Combination of the searches for pair-produced vectorlike partners of the third-generation quarks at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector[J].Physical Review Letters,2018,121(21):211801.
- [7] 高杰.国际直线对撞机研究现状及未来发展[J].物理,2011,40(6):360-365.
GAO J.Status and future developments of the International Linear Collider[J].Physics,2011,40(6):360-365.
- [8] 毕恒恒,汤冬艳,杨炳方.LRTH 模型中 WbT 在直线对撞机上的联合产生[J].郑州师范教育,2018,7(4):14-18.
BI H H,TANG D Y,YANG B F. WbT associated production at linear colliders in the left-right twin Higgs model[J].Journal of Zhengzhou Normal Education,2018,7(4):14-18.
- [9] YANG B F,BI H H,HOU B F,WU B J.Single top partner production in the tZ channel at $e\gamma$ collision in the littlest Higgs model with T-parity[J].Communications in Theoretical Physics,2020,72(8):81-88.
- [10] 杨炳方. $e\gamma$ 对撞机上类矢量顶夸克伴子的寻找[J].郑州师范教育,2020,9(4):1-5.
YANG B F.Search for vector-like top quark partner at $e\gamma$ collider[J].Journal of Zhengzhou Normal Education,2020,9(4):1-5.
- [11] BUCKLEY A,BUTTERWORTH J M,CORPE L,et al.New sensitivity of current LHC measurements to vector-like quarks[J].SciPost Physics,2020,9:69.
- [12] ALWALL J,FREDERIX R,FRIXIONE S,et al.The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections,and their matching to parton shower simulations[J].Journal of High Energy Physics,2014,2014(7):79.
- [13] ZYLA P A,BARNETT R M,BERINGER J,et al.Review of Particle Physics[J].PTEP,2020(8):083C01.
- [14] TORBJORN S,STEFAN A,JESPER R C,et al.An introduction to PYTHIA 8.2[J].Computer Physics Communications,2015,191:159-177.
- [15] COLLABORATION T D,DE FAVEREAU J,DELAERE C,et al.DELPHES 3:a modular framework for fast simulation of a generic collider experiment[J].Journal of High Energy Physics,2014(2):57.
- [16] CONTE E,FUKS B,SERRET G.MadAnalysis 5,a user-friendly framework for collider phenomenology[J].Computer Physics Communications,2013,184(1):222-256.

Single production of the vector-like B quark at CLIC via bZ channel

Cui Xiaomin^a, Li Yazhen^b, Wang Yige^b, Liu Yaobei^a

(a. School of Mechanical and Electrical Engineering; b. School of Mathematics Science,
Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453000, China)

Abstract: Many new physics scenarios beyond the Standard Model predict new vector-like quarks that could produce unique signals at high-energy colliders. Based on a model-independent framework, we investigate the prospect of discovering the singlet vector-like bottom quark(VLQ- B) in collisions at 3 TeV Compact Linear Collider. We study the single VLQ- B production process $e^+e^- \rightarrow B\bar{b} \rightarrow Zb\bar{b}$, with two types of decay channels: $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ and $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$. By carrying out a full simulation for the signals and the relevant SM backgrounds, the exclusion limit and discovery prospects are, respectively, obtained on the VLQ- B quark mass and the coupling strength with the integrated luminosity of 5 ab^{-1} . Our numerical results show that future high-energy linear colliders could serve as ideal sites for probing electroweak coupling of VLQ- B .

Keywords: vector-like quark; Compact Linear Collider; production cross section

[责任编辑 杨浦 刘洋]