

# 双荷电类矢量轻子的衰变

李文君<sup>1</sup>, 苏培庆<sup>1</sup>, Ng John N<sup>2</sup>

(1.河南师范大学 物理与材料科学学院,河南 新乡 453007;2.加拿大粒子加速器中心 理论组,加拿大 温哥华 V6T2A3)

**摘要:**标准模型单态标量粒子  $\Phi$  是 Higgs Portal 标量模型的重要组成部分,可与 Higgs 耦合.Higgs 的发现有助于单态标量粒子  $\Phi$  的研究.增加满足标准模型规范对称性并能和  $\Phi$  耦合的双荷电类矢量轻子,有助于  $\Phi$  在 LHC 或者未来的环形对撞机上的探测.本文在标准模型中加入了一个标准模型单态标量粒子和一个双荷电类矢量轻子二重态,研究了这些双荷电类矢量轻子的衰变.结果表明:双荷电类矢量轻子二重态只与  $e_R$  耦合时,这些衰变过程  $D^- \rightarrow e^- + h^0 (Z^0), \Delta^- \rightarrow e^- + W^-$  和  $\Delta_L^- \rightarrow W^- D_L^{*-}$  可以发生,其中,  $D^- \rightarrow e^- h^0$  衰变占主要地位.由于  $D^-$  和  $\Delta^-$  质量劈裂很小,所以  $D^- \rightarrow \Delta^- W^+$  衰变是运动学禁戒的.

**关键词:**双荷电类矢量轻子;衰变宽度;分支比

**中图分类号:**O572.2

**文献标志码:**A

Higgs Portal 模型是 Patt 和 Wilczek 为研究隐藏部分中的 Higgs 场提出的.该模型中的单态粒子可以是标量粒子,被称为 Higgs Portal 标量模型,其中标准模型单态标量粒子  $\Phi$  可与 Higgs 场耦合<sup>[1-2]</sup>.2012 年实验上发现了 Higgs 粒子,为研究单态标量粒子  $\Phi$  开辟了新通道. $\Phi$  的效应可通过和 Higgs 粒子的混合产生,但是混合很小.这使得无论在高能对撞机实验还是低能的精确检验实验中都很难探测到.引入满足 SM 规范对称性且能和  $\Phi$  耦合的荷电费米子,可以提高  $\Phi$  的探测率.本文考虑引入一个荷电类矢量费米子.因为类矢量费米子的左右手规范群表示相同,规范反常会自动相消,其中超荷  $Y \neq 0$  的 SU(2) 类矢量轻子是很好的选择.但是超荷  $Y=1$  的 SU(2) 类矢量轻子会和标准模型轻子混合,引起参数的精细调节问题.本文将考虑超荷  $Y=-3/2$  的 SU(2) 类矢量轻子二重态  $\mathcal{Q}$  的情况.

双荷电类矢量轻子二重态  $\mathcal{Q}$  属于重轻子.实验方面,国际实验组对荷电重轻子进行了寻找并给出了质量下限  $M > 100 \text{ GeV}$ <sup>[3]</sup>.文献分析了在对撞机上双荷电重轻子通过规范相互作用的单产生、通过 Drell-Yang 过程/胶子聚合/电弱矢量玻色子的成对产生的可能信号<sup>[4-9]</sup>.理论方面,人们从不同角度对双荷电类矢量轻子进行了研究<sup>[10-15]</sup>.Kristjan 的研究小组在 Charged see-saw 模型分析了双荷电类矢量轻子对  $a_\mu$  的贡献,发现它和标准模型弱电部分的贡献量级相当<sup>[12]</sup>.岳崇兴等<sup>[13]</sup>在 331 模型讨论了矢量双轻子对 Higgs 衰变的影响,发现矢量双轻子可以提高  $h \rightarrow \gamma\gamma$  的衰变宽度.张斌等<sup>[14]</sup>对标准模型中只增加一个和 Higgs 耦合的双荷电类矢量轻子二重态的衰变和产生作了讨论.李文君等<sup>[15]</sup>研究了单态双荷电类矢量轻子( $Y=2$ ),分析了它对标量粒子  $\Phi$  衰变的贡献.本文将在在此基础上进一步研究双荷电类矢量轻子 SU(2) 二重态( $Y=-3/2$ )的衰变.它在对撞机上的产生过程的可能信号将在以后的工作中详细讨论.

## 1 双荷电类矢量轻子的衰变

为了提高实验上探测标准模型单态标量粒子  $\Phi$  的可能性,考虑引入超荷  $Y \neq 0$  的双荷电 SU(2) 类矢量轻子.因此在标准模型中加入一个单态标量粒子  $\Phi$  和一个超荷  $Y=-3/2$  的双荷电类矢量轻子 SU(2) 二重态

**收稿日期:**2017-12-27;**修回日期:**2018-06-06.

**基金项目:**国家自然科学基金(11005033)

**作者简介(通信作者):**李文君(1976-),女,河南汤阴人,河南师范大学副教授,主要从事新物理模型唯象研究,E-mail:liwj24@163.com.

$$\mathcal{D} = \begin{pmatrix} D^- \\ \Delta^{--} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

在 SM 规范群下,它的左手和右手的投影有相同的量子数.这与标准模型的费米子不同.

相互作用的拉氏量可表示为

$$\mathcal{L} = \bar{\mathcal{D}} i \gamma_\mu [\partial_\mu + i \frac{g}{2} \tau W_\mu + i \frac{3g'}{2} B_\mu] \mathcal{D} - M \bar{\mathcal{D}} \mathcal{D} - \sum_a^{e, \mu, \tau} Y_a \bar{\mathcal{D}} \ell_{Ra} \bar{H} \ell_R - y_\Phi \bar{\mathcal{D}} \mathcal{D} \Phi - V(\Phi, H) + \text{h.c.}, \quad (2)$$

其中,  $\tau$  为泡利矩阵;  $M$  是双电荷类矢量轻子的质量;  $a = e, \mu, \tau$ ;  $Y_a$  和  $y_\Phi$  为耦合系数.  $\tilde{H} = i\sigma_2 H$ ,  $H$  和  $\Phi$  的参数化形式为

$$H = \begin{pmatrix} \frac{v+h}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \Phi = \frac{\omega + \phi}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

假设二者可以混合,通过混合角为  $\alpha$  的么正矩阵变换为质量本征态

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{h} \\ \hat{\phi} \end{pmatrix}.$$

$V(\Phi, H)$  为标量势:

$$V(\Phi, H) = -\mu^2 H^+ H + \lambda(H^+ H)^2 + \lambda_\Phi(\Phi^+ \Phi)^2 + M_\Phi^2 \Phi^+ \Phi - \lambda_{\Phi h} \Phi^+ \Phi H^+ H.$$

双电荷类矢量轻子  $\mathcal{D}$  和标准模型轻子混合,其质量本征态为  $\hat{L} = VL, \hat{R} = UR, \hat{\Delta} = \Delta$ . 其中左/右手轻子表示为  $L/R = \langle D, e, \mu, \tau \rangle_{L/R}$ , 么正矩阵  $V, U$  可将质量矩阵  $M_i$  对角化

$$V^\dagger M_i U = V^\dagger \begin{pmatrix} M & Y_e \nu & Y_\mu \nu & Y_\tau \nu \\ 0 & y_e \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_\mu \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_\tau \nu \end{pmatrix} U = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_\tau \end{pmatrix} \quad (4)$$

在质量本征态下, (2) 式中的规范相互作用部分为

$$\mathcal{L}^W = \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{i=0}^3 (V_{0i}^\dagger \bar{\Delta}_i \gamma_\mu L_i + U_{0i}^\dagger \bar{\Delta}_R \gamma_\mu^c R_i) W_\mu^- + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{i=0}^3 \sum_{a=e, \mu, \tau} V_{ai} \bar{L}_i \gamma_\mu^c \nu_a W_\mu^- + \text{h.c.}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^Z &= \frac{ig}{c_w} \left\{ \left[ \left( \frac{1}{2} + s_w^2 \right) \sum_{i=0}^3 \bar{L}_i \gamma_\mu L_i + \sum_{i,j=0}^3 V_{0j} \bar{L}_j \gamma_\mu V_{0i}^\dagger L_i \right] + \left[ s_w^2 \sum_{i=0}^3 \bar{R}_i \gamma_\mu R_i + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{1}{2} \sum_{i,j=0}^3 U_{0j} \bar{R}_j \gamma_\mu U_{0i}^\dagger R_i \right] + \frac{1}{2} \sum_{a=e, \mu, \tau} \bar{\nu}_{aL} \gamma_\mu \nu_{aL} + \left( -\frac{1}{2} + 2s_w^2 \right) \bar{\Delta} \gamma_\mu \Delta \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

其中(6)式的第2项和第4项来自于双电荷类矢量轻子二重态与标准模型轻子的混合. 简便起见, 假设双电荷类矢量轻子二重态只与标准模型一代轻子  $e_R$  耦合,  $\Delta^{--}$  和  $D^-$  的质量发生劈裂, 则(4)式简化为

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_L & \sin \theta_L \\ -\sin \theta_L & \cos \theta_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M & Y_e \nu \\ 0 & y_e \nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_R & -\sin \theta_R \\ \sin \theta_R & \cos \theta_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_D & 0 \\ 0 & m_e \end{pmatrix}, \quad (7)$$

其中,  $\theta_{L,R}$  是么正矩阵  $V, U$  的转动角,  $M_D$  是  $D^-$  的质量. 假设电子质量很小  $m_e \approx 0$ , 由(7)式可知,  $\theta_L = 0$ . 在本模型中, 中性规范玻色子与轻子的轴矢耦合系数为  $g_A' = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin^2 \theta_R$ , 由实验值  $g_A' = -0.50123 \pm 0.00026^{[3]}$  可得到对  $\sin \theta_R$  的限制为:  $\sin \theta_R \leq 0.055$ .

下面讨论一下双电荷类矢量轻子的衰变,  $\Phi$  的衰变不在本文中讨论.

由(4)式可知, 双电荷类矢量轻子二重态中的荷电轻子  $D^-$  和双电荷轻子  $\Delta^{--}$  的衰变有  $\hat{D} \rightarrow e + h(Z)$ ,  $\hat{\Delta} \rightarrow e + W, \hat{\Delta}_i \rightarrow W^+ D_L^{*-} \rightarrow W^+ e_R^- h$ . 由于  $M_D - M_\Delta \ll M_W$ , 所以  $D^-$  衰变到  $\Delta^{--} W^+$  是运动学禁戒的.

计算可得, 这些衰变道的衰变宽度

$$\Gamma(\Delta^{--} \rightarrow e^- W^-) = \frac{g^2 \sin^2 \theta_R M_\Delta}{64\pi a^2} (1 - a^2)^2 (1 + 2a^2), \quad (8)$$

$$\Gamma(\Delta^{--} \rightarrow D^- W^+ \rightarrow e^- W^- h) = \frac{g^2 \bar{y}^2 M_\Delta}{4 \cdot 096 \pi^3} \int_a^{1-a^2-b^2} dx \frac{\sqrt{x^2 - 4a^2} (1-x-a^2-b^2)^2}{(1-x-a^2)^2 (1-x+a^2-b^2)^2} \times$$

$$[-4(1+2x)(1-x+a^2) + (2-x)(1-c^2 + \frac{x^2}{a^2})], \quad (9)$$

$$\Gamma(D^- \rightarrow e^- h) = \frac{M_D}{64\pi} \bar{y}^2 (1-d^2)^2, \quad (10)$$

$$\Gamma(D^- \rightarrow e^- Z) = \frac{g^2 \sin^2 \theta_R \cos^2 \theta_R M_D}{128 \pi c_\omega^2 e^2} (1-e^2)^2 (1+2e^2), \quad (11)$$

其中,  $a = \frac{M_W}{M_\Delta}$ ,  $b = \frac{M_h}{M_\Delta}$ ,  $c = \frac{M_D}{M_\Delta}$ ,  $d = \frac{M_h}{M_D}$ ,  $e = \frac{M_Z}{M_D}$ ,  $\bar{y} = Y \cos \theta_R \cos \alpha + y_D \sin \theta_R \sin \alpha$ .

## 2 数值结果和讨论

由(8)~(11)式可知,这些衰变道的衰变宽度和双荷电类矢量轻子的质量  $M_D$ ,  $M_\Delta$ , 混合角  $\theta_R$ ,  $\alpha$  等有关. 其中,  $\sin \theta_R \sim 0.055$ . 和文献[14]的取值一致, 双荷电类矢量轻子质量范围取为  $200 \sim 800$  GeV. 在  $\Gamma(\Delta^{--} \rightarrow D^- W^+ \rightarrow e^- W^- h)$  和  $\Gamma(\Delta^{--} \rightarrow e^- W^-)$  相当的情况下, 将参数  $\bar{y}$  限制为  $\bar{y} \sim 1.25$ .

利用上述参数值, 计算了(8)、(10)和(11)式, 并在图 1 中给出了 3 个衰变道的衰变宽度与双荷电类矢量轻子质量的函数关系图. 3 个衰变道的衰变宽度随着双荷电类矢量轻子质量增加而增加. 其中,  $D^- \rightarrow e^- h^0$  道的衰变宽度对于质量  $M_D$  的变化很敏感. 和  $D^- \rightarrow e^- h^0$  道不同, 由于压低因子  $\frac{g^2 \sin^2 \theta_R}{a^2}$  和  $\frac{g^2 \sin^2 \theta_R}{2c_\omega^2 e^2}$  的存在,  $\Gamma(\Delta^{--} \rightarrow e^- W^-)$  和  $\Gamma(D^- \rightarrow e^- Z^0)$  随双荷电类矢量轻子质量的增加增长缓慢.

下面分析一下荷电轻子  $D^-$  的两个衰变道的衰变分支比. 在图 2 中给出了荷电轻子  $D^-$  的衰变分支比与质量的函数关系图. 在荷电轻子  $D^-$  的衰变道中,  $D^- \rightarrow e^- h^0$  道的衰变占主要地位, 接近于 1.  $\text{Br}(D^- \rightarrow e^- h^0)$  随着  $M_D$  的增大缓慢减小. 不同的是  $D^- \rightarrow e^- Z^0$  衰变.  $\text{Br}(D^- \rightarrow e^- Z^0)$  很小, 可忽略不计.  $\text{Br}(D^- \rightarrow e^- Z^0)$  随着荷电轻子  $M_D$  的增大而缓慢增加. 当  $M_D = 800$  GeV 时,  $\text{Br}(D^- \rightarrow e^- Z^0)$  也只达到 0.067.

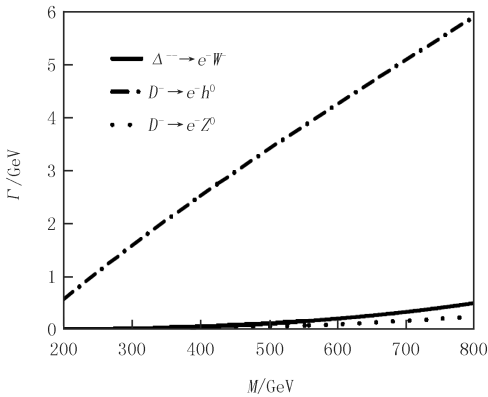


图 1 衰变宽度  $\Gamma$  与荷电类矢量轻子质量  $M$  的函数关系

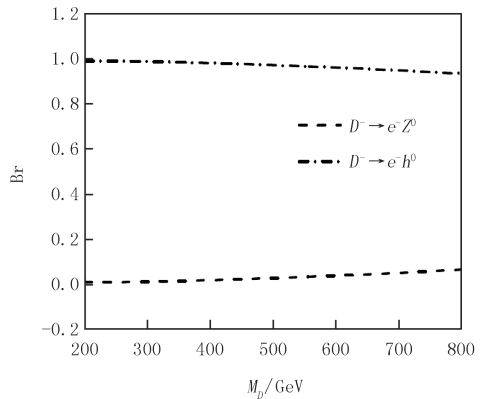


图 2 荷电轻子  $D^-$  的衰变分支比与质量  $M_D$  的关系

## 3 结 论

标准模型单态标量粒子  $\Phi$  是 Higgs Portal 方案的一个重要部分. 本文在标准模型中加入了一个标准模型单态标量粒子  $\Phi$ , 为了提高实验上  $\Phi$  的探测率, 又加入了一个双荷电类矢量轻子二重态, 分析了双荷电类矢量轻子二重态只与一代轻子耦合时的衰变情况. 研究表明: 对于  $D^- \rightarrow e^- + h^0 (Z^0)$ ,  $\Delta^{--} \rightarrow e^- + W^-$  和  $\Delta_L^{--} \rightarrow W^- D_L^+ \rightarrow W^- e_R h^0$  衰变,  $D^- \rightarrow e^- h^0$  衰变占主要地位;  $\Delta^{--} \rightarrow e^- + W^-$  和  $D^- \rightarrow e^- Z^0$  对双荷电类矢量轻子的质量变化不敏感. 本文的研究将为以后实验上探测  $\Phi$  和荷电重轻子提供有效的信息.

## 参 考 文 献

- [1] Patt B, Wilczek F. Higgs-field Portal into Hidden Sectors[J]. Phys Rev D, 2006, 74:115017.
- [2] Chang W F, Ng J N, Wu J M S. A Very Narrow Shadow Extra Z-boson at Colliders[J]. Phys Rev D, 2006, 74:095005.
- [3] Particle Data Group. The Review of Particle Physics[J]. Chin Phys C, 2016, 40:100001.
- [4] Kresimir K, Ivica P, Branimir R. Exotic seesaw-motivated heavy leptons at the LHC[J]. Phys Rev D, 2011, 84:093002.
- [5] Leonardi R, Panella O, Fano L. Doubly charged heavy leptons at LHC via contact interactions[J]. Phys Rev D, 2014, 90:2837.
- [6] Biondini L, Panella O, Pancheri G, et al. Searching for Doubly Charged Leptons at Present and Future Colliders[J]. Nuovo Cim C, 2014, 37(2):91-97.
- [7] Alloul A, Frank M, Fuks B, et al. Doubly-charged particles at the Large Hadron Collider[J]. Phys Rev D, 2013, 88:075004.
- [8] Bulekov O V, Khlopov M Y, Romaniouk A S, et al. Search for Double Charged Particles as Direct Test for Dark Atom Constituents[EB/OL]. [2017-12-16]. <https://arxiv.org/abs/1711.10773>.
- [9] Yu You, Yue Chongxing, Xia Yun. Pair Production of the Doubly Charged Leptons via Electroweak Vector Boson Fusion at the Large Hadron Collider[J]. Chin Phys L, 2014, 31:021201.
- [10] Dermisek R, Lunghi E, Shin S. Two Higgs doublet model with vectorlike leptons and contributions to  $pp \rightarrow WW$  and  $H \rightarrow WW$ [J]. JHEP, 2016(02):119.
- [11] Dermisek R, Lunghi E, Shin S. New decay modes of heavy Higgs bosons in a two Higgs doublet model with vectorlike leptons[J]. JHEP, 2016(05):148.
- [12] Kannike K, Raidal M, Straub D M, et al. Anthropic solution to the magnetic muon anomaly: the charged see-saw[J]. JHEP, 2012(02):106.
- [13] Yue Chong-Xing, Shi Qiu-Yang, Hua Tian. Vector bileptons and the decays  $h \rightarrow \gamma\gamma, Z\gamma$ [J]. Nucl Phys B, 2013, 876(3):747-757.
- [14] Ma T, Zhang B, Cacciapaglia G. Doubly Charged Lepton from an Exotic Doublet at the LHC[J]. Phys Rev D, 2014, 89:093022.
- [15] Li W J, Ng J N. Doubly charged vector leptons and the Higgs portal[J]. Phys Rev D, 2016, 94:095012.

## Doubly charged vector-like lepton decay

Li Wenjun<sup>1</sup>, Su Peiqing<sup>1</sup>, Ng John N<sup>2</sup>

(1. College of Physics and Materials Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;

2. Theory Group, TRIUMF, Vancouver V6T2A3, Canada)

**Abstract:** The SM singlet scalar particle  $\Phi$  is one important part of Higgs Portal model, which could couple with Higgs particles. The finding of Higgs boson is helpful to study the SM singlet scalar particle  $\Phi$ . Introducing doubly charged vector-like leptons satisfying the SM gauge symmetries and coupling to  $\Phi$  plays a vital role in measuring the particle  $\Phi$  at the LHC or the future circular collider. In this paper, we add a SM singlet scalar and one doubly charged vector-like lepton SU(2) doublet and study these lepton decays. The results show that, in the case of doubly charged vector-like lepton doublet only coupling to one SM right-hand lepton, the decays of  $D^- \rightarrow e^- + h^0 (Z^0)$ ,  $\Delta^{--} \rightarrow e^- + W^-$  and  $\Delta^{--} \rightarrow W^- D_L^{*-} \rightarrow W^- e_R^- h^0$  could occur. Among them, the  $D^- \rightarrow e^- h^0$  process is dominant. And due to the small mass split between  $D^-$  and  $\Delta^{--}$ , the decay of  $D^- \rightarrow \Delta^{--} W^+$  is forbidden kinematically.

**Keywords:** doubly charged vector-like lepton; decay width; branching ratio

[责任编辑 杨浦]