

Informe final: Proyecto de investigación: Anomalías del experimento LHCb y los modelos mínimos para resonancias pesadas neutras

Eduardo Rojas Peña

February 25, 2024

1 Resumen

Nuestro proyecto consiste en calcular todas las soluciones para las cargas del Z' permitidas por las ecuaciones de anomalías y las ligaduras provenientes de los términos de Yukawa. Los Z' que consideramos tienen un contenido mínimo de fermiones en el sentido que nuestros modelos solo contienen los fermiones del modelo estándar mas 3 neutrinos derechos. Con estas soluciones ajustamos las anomalías experimentales reportadas por LHCb y obtenemos el rango de valores para las masas y para las cargas del Z' que pueden ser consistente con estas observaciones.

2 Palabras Clave

física del Z' , física mas allá del modelo estándar, anomalías cuánticas, anomalías del LHCb, modelos mínimos.

3 Introducción

Medidas recientes de observables en el experimento LHCb en el CERN se desvian de las predicciones del modelo estandar de partículas elementales a un nivel de 3.7 desviaciones estandar (*i.e.*, 3.7σ). Estas anomalías se han observado en decaimientos raros del B de la forma $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ [1, 2, 3]. Como se ha sugerido en artículos recientes [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], esta clase de anomalías son predicciones genéricas de teorías gauge con un bosón vectorial neutro no universal.

Los últimos resultados experimentales de la colaboración Bell II cambian la tendencia en algunos de los observables relacionados a estas anomalías [13]; estos resultados ponen estos temas como un tópico de primera línea en la física de partículas (para un análisis reciente ver [14]).

Nuestra propuesta es clasificar las soluciones a las ecuaciones de anomalías para los los modelos mínimos [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 6, 24, 25], parte de este análisis ya lo hicimos en nuestros trabajos mas recientes [26, 27]; sin embargo, es necesario encontrar expresiones para las soluciones mas generales removiendo la condición de universalidad. Con el fin de evitar corrientes neutras con cambios de sabor seguiremos el procedimiento propuesto en [27, 28]. Una vez tengamos estas soluciones generales es necesario un análisis de χ^2 para determinar las regiones del espacio de parámetros favorecida por los datos. Este análisis es muy importante ya que los modelos mínimos son los modelos mas próximos al modelo estandar de partículas con un sector electrodébil extendido. En nuestros últimos trabajos con mis colaboradores hemos desarrollado este programa y esperamos que nuestros próximos trabajos tengan un gran impacto en este tema.

Nuestro interés son las extensiones que permiten estudiar las anomalías experimentales que regularmente se presentan en el área. Nuestro programa nos permite poner a la Universidad

de Nariño en contacto con desarrollos teóricos relacionados con la física del LHC *Large hadron collider*. Este experimento es el proyecto mas importante de física de altas energías en el mundo, y con nuestro grupo podemos contribuir en el análisis teórico de la física que se estudia en este laboratorio. Este trabajo permite formar estudiantes a nivel de pregrado y posgrado con una formación muy sólida en investigación y un compromiso con la excelencia académica.

4 Metodología

A continuación se presenta la metodología a seguir, la cual permitirá alcanzar los objetivos propuestos y llevar a cabo el análisis de las predicciones y establecimiento de cotas experimentales de los distintos modelos de nueva física estudiados a lo largo del proyecto.

1. Se calculan las cargas de los modelos, en particular usaremos los modelos de las referencias [29, 30, 31, 32, 29, 33, 34, 35, 36]
2. actualizamos el programa en [37, 26, 38, 39, 27] escrito en fortran 77 con los últimos datos de Atlas publicados en [40].
3. Se implementan los modelos en el programa [37] que calcula la cota inferior para la masa del Z' con un nivel de confianza de 95%.
4. Simulamos posibles datos de un experimento de acuerdo con el modelo estándar con el fin de calcular la capacidad de LHC para excluir resonancias vectoriales neutras para una energía de centro de masa de 13GeV, 14GeV, para los valores típicos de luminosidades integradas en LHC.

5 Resultados del Proyecto

Este proyecto tuvo varias resultados.

Se graduó la estudiante de pregrado Laura Muñoz. Respecto a publicaciones los artículos que agradecen a este proyecto son:

1. B meson anomalies within the triplet vector boson model to the light of recent measurements from LHCb Phys.Rev.D 109 (2024) 1, 015029 • e-Print: 2203.14172 [hep-ph] [41]
2. Systematic study of the $SU(3)_c \otimes SU(3)_L \otimes U(1)_X$ local gauge symmetry”, Published in: J.Phys.G 49 (2022) 10, 105007 • e-Print: 2111.02563 [hep-ph] [42]
3. Extra gauge bosons and lepton flavor universality violation in Υ and B meson decays”, Phys.Rev.D 103 (2021) 7, 073003 e-Print: 2103.00344 [hep-ph] [43]
4. Podolsky propagator in the gap and bound-state equations Phys.Rev.D 103 (2021) 7, 076008 • e-Print: 2010.15993 [hep-ph] [44]
5. Flavored axions and the flavor problem Eur.Phys.J.C 82 (2022) 12, 1131 • e-Print: 2007.05653 [hep-ph] [45]
6. Analysing the charged scalar boson contribution to the charged-current B meson anomalies J.Phys.G 48 (2021) 3, 035001 • e-Print: 2006.07751 [hep-ph] [46]
7. Five Texture Zeros for Dirac Neutrino Mass Matrices J.Phys.G 47 (2020) 11, 115002 • e-Print: 2002.01864 [hep-ph] [47]
8. Charged current $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}_\tau$ anomalies in a general W' boson scenario, J.Phys.G 47 (2020) 7, 075003 • e-Print: 1812.05077 [hep-ph] [48]
9. Minimal Z models for flavor anomalies J.Phys.G 47 (2020) 7, 075003 • e-Print: 1812.05077 [hep-ph] [27]

6 Conclusiones

Hemos presentado los resultados del proyecto de investigación. De igual forma hemos contribuido a la formación de recursos humanos. Es importante mencionar, que durante el desarrollo de este proyecto se formó el semillero de estudiantes de física de altas energías de la universidad de Nariño. Se ha hecho un seminario semanal, donde se han dado charlas sobre todos los tópicos (no sólo altas energías), sin embargo esta actividad ha sido coordinada por la dirección del departamento y por el grupo de altas energías. Aunque estos hechos no constituyen productos del proyecto, son muy significativos en lo que tiene ver con la formación de recursos humanos.

Actividad	Número de productos
Dirección de trabajos de grado	1
Número de artículos publicados	9

7 Recomendaciones

- Cuando uno sube un producto para recibir puntos salariales, debería existir una forma de relacionar esta información con los proyectos para evitar que tener que citar nuevamente todos los resultados con la VIIS.

References

- [1] R. Aaij *et al.* [LHCb], Phys. Rev. Lett. **111**, 191801 (2013) doi:10.1103/PhysRevLett.111.191801 [arXiv:1308.1707 [hep-ex]].
- [2] R. Aaij *et al.* [LHCb], JHEP **08**, 131 (2013) doi:10.1007/JHEP08(2013)131 [arXiv:1304.6325 [hep-ex]].
- [3] S. Jäger and J. Martin Camalich, Phys. Rev. D **93**, no.1, 014028 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.93.014028 [arXiv:1412.3183 [hep-ph]].
- [4] J. Ellis, M. Fairbairn and P. Tunney, Eur. Phys. J. C **78**, no.3, 238 (2018) doi:10.1140/epjc/s10052-018-5725-0 [arXiv:1705.03447 [hep-ph]].
- [5] R. Alonso, P. Cox, C. Han and T. T. Yanagida, Phys. Lett. B **774**, 643-648 (2017) doi:10.1016/j.physletb.2017.10.027 [arXiv:1705.03858 [hep-ph]].
- [6] Y. Tang and Y. L. Wu, Chin. Phys. C **42**, no.3, 033104 (2018) [erratum: Chin. Phys. C **44**, no.6, 069101 (2020)] doi:10.1088/1674-1137/42/3/033104 [arXiv:1705.05643 [hep-ph]].
- [7] C. W. Chiang, X. G. He, J. Tandean and X. B. Yuan, Phys. Rev. D **96**, no.11, 115022 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.115022 [arXiv:1706.02696 [hep-ph]].
- [8] S. F. King, JHEP **08**, 019 (2017) doi:10.1007/JHEP08(2017)019 [arXiv:1706.06100 [hep-ph]].
- [9] R. S. Chivukula, J. Isaacson, K. A. Mohan, D. Sengupta and E. H. Simmons, Phys. Rev. D **96**, no.7, 075012 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.075012 [arXiv:1706.06575 [hep-ph]].
- [10] S. Baek, Phys. Lett. B **781**, 376-382 (2018) doi:10.1016/j.physletb.2018.04.012 [arXiv:1707.04573 [hep-ph]].
- [11] L. Bian, S. M. Choi, Y. J. Kang and H. M. Lee, Phys. Rev. D **96**, no.7, 075038 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.96.075038 [arXiv:1707.04811 [hep-ph]].
- [12] M. Abdullah, M. Dalchenko, B. Dutta, R. Eusebi, P. Huang, T. Kamon, D. Rathjens and A. Thompson, Phys. Rev. D **97**, no.7, 075035 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.97.075035 [arXiv:1707.07016 [hep-ph]].

- [13] A. Abdesselam *et al.* [Belle], [arXiv:1904.08794 [hep-ex]].
- [14] C. Murgui, A. Peñuelas, M. Jung and A. Pich, JHEP **09**, 103 (2019) doi:10.1007/JHEP09(2019)103 [arXiv:1904.09311 [hep-ph]].
- [15] X. G. He, G. C. Joshi, H. Lew and R. R. Volkas, Phys. Rev. D **43**, 22-24 (1991) doi:10.1103/PhysRevD.43.R22
- [16] X. G. He, G. C. Joshi, H. Lew and R. R. Volkas, Phys. Rev. D **44**, 2118-2132 (1991) doi:10.1103/PhysRevD.44.2118
- [17] T. Appelquist, B. A. Dobrescu and A. R. Hopper, Phys. Rev. D **68**, 035012 (2003) doi:10.1103/PhysRevD.68.035012 [arXiv:hep-ph/0212073 [hep-ph]].
- [18] M. Carena, A. Daleo, B. A. Dobrescu and T. M. P. Tait, Phys. Rev. D **70**, 093009 (2004) doi:10.1103/PhysRevD.70.093009 [arXiv:hep-ph/0408098 [hep-ph]].
- [19] P. Langacker, Rev. Mod. Phys. **81**, 1199-1228 (2009) doi:10.1103/RevModPhys.81.1199 [arXiv:0801.1345 [hep-ph]].
- [20] E. Salvioni, A. Strumia, G. Villadoro and F. Zwirner, JHEP **03**, 010 (2010) doi:10.1007/JHEP03(2010)010 [arXiv:0911.1450 [hep-ph]].
- [21] A. Crivellin, G. D'Ambrosio and J. Heeck, Phys. Rev. D **91**, no.7, 075006 (2015) doi:10.1103/PhysRevD.91.075006 [arXiv:1503.03477 [hep-ph]].
- [22] E. Ma, Phys. Rev. D **94**, no.3, 031701 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.94.031701 [arXiv:1606.06679 [hep-ph]].
- [23] C. Kownacki, E. Ma, N. Pollard and M. Zakeri, Phys. Lett. B **766**, 149-152 (2017) doi:10.1016/j.physletb.2017.01.013 [arXiv:1611.05017 [hep-ph]].
- [24] T. Bandyopadhyay, G. Bhattacharyya, D. Das and A. Raychaudhuri, Phys. Rev. D **98**, no.3, 035027 (2018) doi:10.1103/PhysRevD.98.035027 [arXiv:1803.07989 [hep-ph]].
- [25] G. Arcadi, T. Hugle and F. S. Queiroz, Phys. Lett. B **784**, 151-158 (2018) doi:10.1016/j.physletb.2018.07.028 [arXiv:1803.05723 [hep-ph]].
- [26] R. Benavides, L. A. Muñoz, W. A. Ponce, O. Rodríguez and E. Rojas, Phys. Rev. D **95**, no.11, 115018 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.95.115018 [arXiv:1612.07660 [hep-ph]].
- [27] R. H. Benavides, L. Muñoz, W. A. Ponce, O. Rodríguez and E. Rojas, J. Phys. G **47**, no.7, 075003 (2020) doi:10.1088/1361-6471/ab8d8d [arXiv:1812.05077 [hep-ph]].
- [28] P. Langacker and M. Plumacher, Phys. Rev. D **62**, 013006 (2000) doi:10.1103/PhysRevD.62.013006 [arXiv:hep-ph/0001204 [hep-ph]].
- [29] A. J. Buras, F. De Fazio and J. Girrbach-Noe, JHEP **08**, 039 (2014) doi:10.1007/JHEP08(2014)039 [arXiv:1405.3850 [hep-ph]].
- [30] A. J. Buras, F. Schwab and S. Uhlig, Rev. Mod. Phys. **80**, 965-1007 (2008) doi:10.1103/RevModPhys.80.965 [arXiv:hep-ph/0405132 [hep-ph]].
- [31] A. J. Buras, F. De Fazio, J. Girrbach and M. V. Carlucci, JHEP **02**, 023 (2013) doi:10.1007/JHEP02(2013)023 [arXiv:1211.1237 [hep-ph]].
- [32] A. J. Buras and J. Girrbach, Rept. Prog. Phys. **77**, 086201 (2014) doi:10.1088/0034-4885/77/8/086201 [arXiv:1306.3775 [hep-ph]].
- [33] W. A. Ponce, J. F. Zapata and D. E. Jaramillo, [arXiv:hep-ph/0102142 [hep-ph]].
- [34] L. A. Sanchez, W. A. Ponce and R. Martinez, Phys. Rev. D **64**, 075013 (2001) doi:10.1103/PhysRevD.64.075013 [arXiv:hep-ph/0103244 [hep-ph]].

- [35] R. Martinez, W. A. Ponce and L. A. Sanchez, Phys. Rev. D **65**, 055013 (2002) doi:10.1103/PhysRevD.65.055013 [arXiv:hep-ph/0110246 [hep-ph]].
- [36] W. A. Ponce, Y. Giraldo and L. A. Sanchez, AIP Conf. Proc. **623**, no.1, 341-346 (2002) doi:10.1063/1.1489776 [arXiv:hep-ph/0201133 [hep-ph]].
- [37] J. Erler, P. Langacker, S. Munir and E. Rojas, JHEP **11**, 076 (2011) doi:10.1007/JHEP11(2011)076 [arXiv:1103.2659 [hep-ph]].
- [38] R. H. Benavides, L. Muñoz, W. A. Ponce, O. Rodríguez and E. Rojas, Int. J. Mod. Phys. A **33**, no.35, 1850206 (2018) doi:10.1142/S0217751X18502068 [arXiv:1801.10595 [hep-ph]].
- [39] D. J. Blandon, D. A. Restrepo, W. A. Ponce and E. Rojas, [arXiv:1812.03908 [hep-ph]].
- [40] G. Aad *et al.* [ATLAS], Phys. Rev. D **90**, no.5, 052005 (2014) doi:10.1103/PhysRevD.90.052005 [arXiv:1405.4123 [hep-ex]].
- [41] J. M. Cabarcas, J. H. Muñoz, N. Quintero-Poveda and E. Rojas, Phys. Rev. D **109**, no.1, 015029 (2024) doi:10.1103/PhysRevD.109.015029 [arXiv:2203.14172 [hep-ph]].
- [42] R. H. Benavides, Y. Giraldo, L. Muñoz, W. A. Ponce and E. Rojas, J. Phys. G **49**, no.10, 105007 (2022) doi:10.1088/1361-6471/ac894a [arXiv:2111.02563 [hep-ph]].
- [43] C. H. García-Duque, J. H. Muñoz, N. Quintero and E. Rojas, Phys. Rev. D **103**, no.7, 073003 (2021) doi:10.1103/PhysRevD.103.073003 [arXiv:2103.00344 [hep-ph]].
- [44] B. El-Bennich, G. Ramos-Zambrano and E. Rojas, Phys. Rev. D **103**, no.7, 076008 (2021) doi:10.1103/PhysRevD.103.076008 [arXiv:2010.15993 [hep-ph]].
- [45] Y. Giraldo, R. Martinez, E. Rojas and J. C. Salazar, Eur. Phys. J. C **82**, no.12, 1131 (2022) doi:10.1140/epjc/s10052-022-11073-7 [arXiv:2007.05653 [hep-ph]].
- [46] J. Cardozo, J. H. Muñoz, N. Quintero and E. Rojas, J. Phys. G **48**, no.3, 035001 (2021) doi:10.1088/1361-6471/abc865 [arXiv:2006.07751 [hep-ph]].
- [47] R. H. Benavides, Y. Giraldo, L. Muñoz, W. A. Ponce and E. Rojas, J. Phys. G **47**, no.11, 115002 (2020) doi:10.1088/1361-6471/abb029 [arXiv:2002.01864 [hep-ph]].
- [48] J. D. Gómez, N. Quintero and E. Rojas, Phys. Rev. D **100**, no.9, 093003 (2019) doi:10.1103/PhysRevD.100.093003 [arXiv:1907.08357 [hep-ph]].