

TEST DE UNIVERSALIDAD LEPTÓNICA Y EL MODELO DE PATI-SALAM

OSCAR DAVID ROSERO CÁRDENAS

Proyecto trabajo de grado

EDUARDO ROJAS PEÑA, Ph.D
Profesor tiempo completo. Universidad de Nariño

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS, DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PASTO, NARIÑO
2022

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ÁREA DE ESTUDIO	2
3. CONTEXTO	2
4. ANTECEDENTES	3
5. OBJETIVOS	5
5.1. OBJETIVO GENERAL	5
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
6. METODOLOGÍA	6
7. RECURSOS	6
7.1. PERSONALES	6
7.2. MATERIALES	6
8. CRONOGRAMA	7

TEST DE UNIVERSALIDAD LEPTÓNICA

RESUMEN

Las mediciones experimentales de decaimientos semileptónicos del quark b se han desviado de las predicciones del modelo estándar (ME). Particularmente, las anomalías en los decaimientos del mesón B , que sugieren una violación en la universalidad leptónica, son quizás la evidencia directa más significativa de nueva física más allá del ME. El objeto de estudio del presente trabajo es un modelo realista que busca dar cuenta de dichas anomalías en el modelo de unificación de Pati-Salam, el cual es bien conocido en la literatura. Parte de los bosones mediadores en este modelo son leptoquarks vectoriales $(3, 1)_{2/3}$ y está basado en el grupo gauge de simetría $SU(4)_L \times SU(4)_R \times SU(2)_L \times U(1)'$. Nuestro trabajo consiste en realizar un estudio detallado de dicho modelo, reproducir los resultados encontrados en otras investigaciones a partir del mismo y hacer un análisis de χ^2 para verificar si existen tensiones entre los datos experimentales y el modelo teórico.

1. INTRODUCCIÓN

El modelo estándar (ME) proporciona una descripción de la naturaleza notablemente exitosa a nivel de partículas elementales y, hasta ahora, solo hay un puñado de indicaciones experimentales de desviaciones de sus predicciones. Quizás la evidencia directa más significativa de física más allá del ME son las anomalías recientemente observadas en las desintegraciones del mesón B [1, 2], que sugieren que la universalidad leptónica podría violarse. Suponiendo que esas anomalías no son el resultado de errores sistemáticos, se explican mejor con un leptokuark vectorial $(3, 1)_{2/3}$ ó $(3, 3)_{2/3}$ ¹ [3, 4, 5]. Sin embargo, la construcción de modelos UV-completos – es decir, que sean viables en un marco general a energías arbitrariamente altas – que involucren tales partículas es un desafío, especialmente a la luz de las estrictas restricciones sobre la violación del sabor leptónico (VSL) de varias búsquedas experimentales.

Un intento por construir un modelo de leptokuark vectorial para las anomalías observadas en la razón $R_{K^{(*)}}$ entre los branchings de los modos de decaimiento semieptónico del mesón B con un kaón en el estado final, se realizó en [6], donde Assad, Fornal y Grinstein proponen que el leptokuark vectorial $(3, 1)_{2/3}$, que explica las anomalías, podría ser el bosón gauge de una teoría como la de unificación de Pati-Salam [7]. La conclusión fue que el modelo mínimo basado en $SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ no es capaz de hacer esto debido a límites estrictos en decaimientos raros del kaón y el mesón B [8, 9, 10, 11, 12, 13]. El problema subyacente en ese modelo surge de la interferencia entre corrientes leptónicas izquierdas y derechas que cambian de sabor. Fornal y sus colaboradores proponen una solución a esto: extendiendo el grupo gauge a $SU(4)_L \times SU(4)_R \times SU(2)_L \times U(1)'$ y rompiendo $SU(4)_R$ a una escala alta, de modo que las corrientes leptónicas derechas con cambio de sabor se supriman.

Un planteamiento viable de tal modelo, que extiende el grupo gauge, es el tema del trabajo de Fornal, et.al. [14]. En él se demuestra que un leptokuark gauge de Pati-Salam tan liviano como 10 TeV puede explicar las anomalías $R_{K^{(*)}}$ y seguir siendo coherente con todos los límites experimentales sin introducir ninguna mezcla de quarks y leptones con nuevos fermiones. Discutiremos en detalle las limitaciones que surgen de las búsquedas de VSL y mostraremos que la ausencia de corrientes leptónicas derechas con cambio de sabor relaja los límites considerablemente. Se espera que el modelo tenga observables que permitan distinguirlo en futuros colisionadores.

Varios modelos diferentes para las anomalías de sabor basados en la unificación de Pati-Salam han sido propuestos [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Esos modelos evaden las restricciones experimentales mezclando todos o un subconjunto de quarks y leptones del Modelo Estándar con nuevos fermiones vectoriales. Otros enfoques para explicar las anomalías del decaimiento del mesón B que involucran leptokuarks escalares o Z' en lugar de leptokuarks vectoriales también han sido propuestos (ver, por ejemplo, [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]).

¹Esto es, leptokuarks vectoriales con hipercarga $2/3$ y que son, triplete de $SU(3)$ del color, singlete de $SU(2)_L$, o triplete de $SU(3)$ del color, triplete de $SU(2)_L$ respectivamente.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo de grado propuesto pertenece al área de estudio de física de partículas y teoría cuántica de campos. Es un trabajo teórico.

3. CONTEXTO

El trabajo requiere fundamentos sólidos de física teórica, incluyendo mecánica analítica, mecánica cuántica, física de partículas y teoría cuántica de campos. También es importante contar con bases sólidas en física matemática, especialmente análisis tensorial, transformada de Fourier, variable compleja y comprender conceptos en teoría de grupos. El análisis de χ^2 que se hará hacia el final del proyecto requiere de conceptos en probabilidad y estadística. Hasta el momento he cursado todas las materias que tratan las temáticas mencionadas, excepto los conceptos sobre teoría de grupos, que no se tratan en ninguna materia del pènsun de física. Estos conceptos se están estudiando bajo la guía del asesor del proyecto de grado, como parte de la fundamentación preliminar para su desarrollo.

4. ANTECEDENTES

Durante la década pasada varias medidas de decaimientos semileptónicos del quark b (i.e. decaimientos en mesones livianos y pares de leptones en el estado final) se han desviado de las predicciones del ME. Tales discrepancias son conocidos colectivamente como “anomalías de sabor” y típicamente, exhiben variaciones a nivel de $2-3\sigma$ de desviación estándar entre los resultados experimentales y las predicciones del ME. Un aspecto interesante de tales anomalías se debe al hecho de que todas ellas parecen apuntar a la presencia de violaciones en la universalidad de sabor leptónica (USL) en las interacciones que median los procesos. El año pasado, medidas de decaimientos raros $B^+ \rightarrow K^+\ell^+\ell^-$, con ℓ denotando un electrón o un muón han proporcionado evidencia adicional de rompimiento de la USL en decaimientos de quarks beauty en un sólo proceso, con una significancia de $3,1\sigma$, para una luminosidad acumulada de 9fb^{-1} de datos de colisiones protón-protón recolectados en el LHCb [30].

El modelo de Pati-Salam es una teoría unificada basada en el grupo gauge $SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ que extiende el ME y busca determinar el orden intrínseco subyacente en su aparente arbitrariedad. Varios modelos basados en la unificación de Pati-Salam han sido propuestos para intentar dar razón de las anomalías de sabor, algunos de ellos mezclan todos o un subconjunto de quarks y leptones del ME con nuevos fermiones vectoriales [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21], mientras que otros introducen leptoquarks escalares o Z' en lugar de leptoquarks vectoriales [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29].

En el mes de enero, Addazi y sus colaboradores presentaron un artículo [31] aún no publicado que interpreta las anomalías en los decaimientos del bosón B en términos de una teoría gauge 331 extendida, agregando dos especies adicionales de leptones con cargas 331 exóticas. En contraste con los modelos 331 canónicos, las cargas gauge de las dos primeras familias de leptones difieren la una de la otra, permitiendo violación de la USL. La novedad de este artículo muestra que la temática del presente trabajo es un área de gran interés en la física actual y cuya investigación arroja resultados importantes que abren caminos a nuevas exploraciones en la frontera de nuestro actual conocimiento.

Un modelo de interés para explicar las anomalías de sabor es descrito en [14]. Tal modelo sigue el esquema de unificación de Pati-Salam, se construye a partir de las interacciones del leptoquark vectorial $(3, 1)_{2/3}$ y está basado en el grupo gauge $SU(4)_L \times SU(4)_R \times SU(2)_L \times U(1)'$. El modelo provee una explicación realista de las anomalías de sabor sin introducir ninguna mezcla de quarks y leptones con nuevos fermiones. Este modelo es el objeto principal de estudio del presente trabajo.

Los investigadores del grupo de investigación en Física de Altas Energías de la Universidad de Nariño han estudiado en trabajos pasados las anomalías de sabor. En particular el asesor del presente trabajo cuenta con varios trabajos publicados sobre el tema [32, 33, 34, 35], que acumulan más de 30 citas. En 2016 publicó, junto a sus colaboradores, un estudio sobre extensiones mínimas electrodébiles no universales al ME, un modelo que sólo requiere fermiones

del modelo estándar y neutrinos derechos [35]. En un trabajo de 2019 analiza anomalías de la corriente cargada $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}_\tau$ en un escenario general del bosón W' . En dicho trabajo no se considera ningún modelo específico de nueva física, sino que se ejecuta un análisis considerando todas las diferentes cargas quirales de los términos de interacción charm-bottom y $\tau - \nu_\tau$ con un bosón W' para explicar las anomalías [34]. En 2020 publicó un trabajo [32] donde analiza la contribución del bosón escalar a la anomalías de corriente cargada del mesón B , llevando a cabo un estudio fenomenológico del espacio de parámetros de los acoplamientos de Yukawa que acomoda las anomalías. Finalmente, en un artículo de 2021 el Doctor Rojas y sus colaboradores vuelven sobre las consecuencias de nueva física de las anomalías en mediciones de la corriente cargada $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}_\tau$ y la corriente neutra $b\bar{b} \rightarrow \tau\bar{\tau}$, dentro de un modelo simplificado con bosones gauge masivos adicionales que se acoplan predominantemente a los leptones izquierdos de la tercera generación. Sus resultados apuntan a nuevos observables anómalos [33].

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la violación de universalidad leptónica en experimentos de colisionadores y los posibles modelos de nueva física que pueden explicar estas anomalías.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el modelo de Pati-Salam en el contexto de la teoría cuántica de campos.
- Utilizar el modelo de Pati-Salam para explicar las anomalías del sabor.

6. 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 del modelo estudiado a lo largo del proyecto.

1. Revisión bibliográfica de la literatura.
2. Estudiar el artículo [14] detalladamente.
3. Análisis de χ^2 para ver si hay una discrepancia entre el experimento y el modelo teórico propuesto.
4. Escritura de la tesis. Transversal a todo el trabajo.

7. RECURSOS

7.1. PERSONALES

DESCRIPCIÓN	COSTO EN 4 MESES (COP)	FUENTE DE FINANCIACIÓN
2 horas semanales del director de trabajo de grado.	1.200.000	UdeNar
24 horas semanales dedicadas por el estudiante.	4.800.000	Estudiante

7.2. MATERIALES

DETALLE	USO	TOTAL (COP)	FUENTE DE FINANCIACIÓN
Computador	5 años	1.000.000	Estudiante
Papelería e impresiones	1 año	200.000	Estudiante

8. CRONOGRAMA

La ejecución del presente trabajo de grado está destinada a desarrollarse dentro de los cuatro meses establecidos para el décimo semestre del programa de física. A continuación se presenta el cronograma de actividades que se llevarán a cabo.

ACTIVIDAD	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4
Revisión bibliográfica.				
Estudio detallado del artículo de Fornal et. al. y planteamiento de modelos.				
Análisis de χ^2 para verificar tensiones en el modelo.				
Elaboración del manuscrito de trabajo de grado.				

Referencias

- [1] R. Aaij *et al.*, “Test of lepton universality using $B^+ \rightarrow K^+\ell^+\ell^-$ decays,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, p. 151601, 2014.
- [2] R. Aaij *et al.*, “Test of lepton universality with $B^0 \rightarrow K^{*0}\ell^+\ell^-$ decays,” *JHEP*, vol. 08, p. 055, 2017.
- [3] R. Alonso, B. Grinstein, and J. Martin Camalich, “Lepton universality violation and lepton flavor conservation in B -meson decays,” *JHEP*, vol. 10, p. 184, 2015.
- [4] R. Alonso, B. Grinstein, and J. Martin Camalich, “ $SU(2) \times U(1)$ gauge invariance and the shape of new physics in rare B decays,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, p. 241802, 2014.
- [5] N. Kosnik, “Model independent constraints on leptoquarks from $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ processes,” *Phys. Rev. D*, vol. 86, p. 055004, 2012.
- [6] N. Assad, B. Fornal, and B. Grinstein, “Baryon Number and Lepton Universality Violation in Leptoquark and Diquark Models,” *Phys. Lett. B*, vol. 777, pp. 324–331, 2018.
- [7] J. C. Pati and A. Salam, “Lepton Number as the Fourth Color,” *Phys. Rev. D*, vol. 10, pp. 275–289, 1974. [Erratum: *Phys.Rev.D* 11, 703–703 (1975)].
- [8] G. Valencia and S. Willenbrock, “Quark - lepton unification and rare meson decays,” *Phys. Rev. D*, vol. 50, pp. 6843–6848, 1994.
- [9] A. D. Smirnov, “Mass limits for scalar and gauge leptoquarks from $K(L)0 \rightarrow e^+ \mu^+ \nu$, $B0 \rightarrow e^+ \tau^+ \nu$ decays,” *Mod. Phys. Lett. A*, vol. 22, pp. 2353–2363, 2007.
- [10] A. D. Smirnov, “Contributions of gauge and scalar leptoquarks to $K0(L) \rightarrow l(i)^+ l(j)^-$ and $B0 \rightarrow l(i)^+ l(j)^-$ decay and constraints on leptoquark masses from the decays $K0(L) \rightarrow e^+ \mu^+ \nu$ and $B0 \rightarrow e^+ \tau^+ \nu$,” *Phys. Atom. Nucl.*, vol. 71, pp. 1470–1480, 2008.
- [11] M. Carpentier and S. Davidson, “Constraints on two-lepton, two quark operators,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 70, pp. 1071–1090, 2010.
- [12] A. V. Kuznetsov, N. V. Mikheev, and A. V. Serghienko, “The third type of fermion mixing in the lepton and quark interactions with leptoquarks,” *Int. J. Mod. Phys. A*, vol. 27, p. 1250062, 2012.
- [13] A. D. Smirnov, “Vector leptoquark mass limits and branching ratios of $K_L^0, B^0, B_s \rightarrow l_i^+ l_j^-$ decays with account of fermion mixing in leptoquark currents,” *Mod. Phys. Lett. A*, vol. 33, p. 1850019, 2018.
- [14] B. Fornal, S. A. Gadam, and B. Grinstein, “Left-Right $SU(4)$ Vector Leptoquark Model for Flavor Anomalies,” *Phys. Rev. D*, vol. 99, no. 5, p. 055025, 2019.

- [15] L. Di Luzio, A. Greljo, and M. Nardecchia, “Gauge leptoquark as the origin of B-physics anomalies,” *Phys. Rev. D*, vol. 96, no. 11, p. 115011, 2017.
- [16] L. Calibbi, A. Crivellin, and T. Li, “Model of vector leptoquarks in view of the B -physics anomalies,” *Phys. Rev. D*, vol. 98, no. 11, p. 115002, 2018.
- [17] M. Bordone, C. Cornella, J. Fuentes-Martin, and G. Isidori, “A three-site gauge model for flavor hierarchies and flavor anomalies,” *Phys. Lett. B*, vol. 779, pp. 317–323, 2018.
- [18] R. Barbieri and A. Tesi, “ B -decay anomalies in Pati-Salam $SU(4)$,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 78, no. 3, p. 193, 2018.
- [19] M. Blanke and A. Crivellin, “ B Meson Anomalies in a Pati-Salam Model within the Randall-Sundrum Background,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, no. 1, p. 011801, 2018.
- [20] A. Greljo and B. A. Stefanek, “Third family quark–lepton unification at the TeV scale,” *Phys. Lett. B*, vol. 782, pp. 131–138, 2018.
- [21] S. Balaji, R. Foot, and M. A. Schmidt, “Chiral $SU(4)$ explanation of the $b \rightarrow s$ anomalies,” *Phys. Rev. D*, vol. 99, no. 1, p. 015029, 2019.
- [22] D. Marzocca, “Addressing the B-physics anomalies in a fundamental Composite Higgs Model,” *JHEP*, vol. 07, p. 121, 2018.
- [23] U. Aydemir, D. Minic, C. Sun, and T. Takeuchi, “ B -decay anomalies and scalar leptoquarks in unified Pati-Salam models from noncommutative geometry,” *JHEP*, vol. 09, p. 117, 2018.
- [24] D. Bečirević, I. Doršner, S. Fajfer, N. Košnik, D. A. Faroughy, and O. Sumensari, “Scalar leptoquarks from grand unified theories to accommodate the B -physics anomalies,” *Phys. Rev. D*, vol. 98, no. 5, p. 055003, 2018.
- [25] D. Guadagnoli, M. Reboud, and O. Sumensari, “A gauged horizontal $SU(2)$ symmetry and $R_{K^{(*)}}$,” *JHEP*, vol. 11, p. 163, 2018.
- [26] S.-P. Li, X.-Q. Li, Y.-D. Yang, and X. Zhang, “ $R_{D^{(*)}}, R_{K^{(*)}}$ and neutrino mass in the 2HDM-III with right-handed neutrinos,” *JHEP*, vol. 09, p. 149, 2018.
- [27] T. Faber, M. Hudec, M. Malinský, P. Meinzinger, W. Porod, and F. Staub, “A unified leptoquark model confronted with lepton non-universality in B -meson decays,” *Phys. Lett. B*, vol. 787, pp. 159–166, 2018.
- [28] J. Heeck and D. Teresi, “Pati-Salam explanations of the B-meson anomalies,” *JHEP*, vol. 12, p. 103, 2018.
- [29] B. C. Allanach and J. Davighi, “Third family hypercharge model for $R_{K^{(*)}}$ and aspects of the fermion mass problem,” *JHEP*, vol. 12, p. 075, 2018.
- [30] R. Aaij *et al.*, “Test of lepton universality in beauty-quark decays,” 3 2021.

- [31] A. Addazi, G. Ricciardi, S. Scarlatella, R. Srivastava, and J. W. F. Valle, “An old theme for new data: Interpreting recent B anomaly data within an extended 331 gauge theory,” 1 2022.
- [32] J. Cardozo, J. H. Muñoz, N. Quintero, and E. Rojas, “Analysing the charged scalar boson contribution to the charged-current B meson anomalies,” *J. Phys. G*, vol. 48, no. 3, p. 035001, 2021.
- [33] C. H. García-Duque, J. H. Muñoz, N. Quintero, and E. Rojas, “Extra gauge bosons and lepton flavor universality violation in Υ and B meson decays,” *Phys. Rev. D*, vol. 103, no. 7, p. 073003, 2021.
- [34] J. D. Gómez, N. Quintero, and E. Rojas, “Charged current $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}_\tau$ anomalies in a general W' boson scenario,” *Phys. Rev. D*, vol. 100, no. 9, p. 093003, 2019.
- [35] R. Benavides, L. A. Muñoz, W. A. Ponce, O. Rodríguez, and E. Rojas, “Minimal nonuniversal electroweak extensions of the standard model: A chiral multiparameter solution,” *Phys. Rev. D*, vol. 95, no. 11, p. 115018, 2017.