

CAMPOS ESCALARES EXÓTICOS MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR PARA RESOLVER LA ANOMALÍA $g - 2$

CRISTIAN CAMILO CERÓN CERÓN

Proyecto de Trabajo de Grado

Dr. EDUARDO ROJAS PEÑA
Profesor tiempo completo. Universidad de Nariño

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

Índice

1. INTRODUCCIÓN	2
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	7
8. CRONOGRAMA	7

CAMPOS ESCALARES EXÓTICOS MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR PARA RESOLVER LA ANOMALÍA $g - 2$

RESUMEN

Incluimos correcciones radiativas de un campo escalar exótico al momento magnético anómalo del muón $g - 2$. Este observable, i.e., $g - 2$, se desvía en más de tres σ de la predicción del modelo estándar de partículas y por tanto es posible que esta anomalía sea una consecuencia de física más allá del modelo estándar. Con nuestro proyecto de investigación esperamos explicar los datos experimentales por medio de **la** partícula escalar exótica. Parte del proyecto es aprender los fundamentos básicos de las teorías cuánticas de campos para hacer investigación en física de partículas.

1. INTRODUCCIÓN

La medida experimental del momento magnético anómalo del muón se ha apartado de la predicción del modelo estándar por muchos años a un nivel de $3,6\sigma$ [41]. Se han propuesto muchas soluciones teóricas para este problema [43, 44, 45, 46, 47, 48, 49]. Nuestro proyecto de grado consiste en proponer un modelo con contenido mínimo de partículas [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 2, 12, 13], que pueda disminuir la tensión entre este observable y las predicciones del modelo estándar.

El problema se solucionará a partir de un modelo fundamental en una Teoría cuántica de campos (TCC) que combina de forma exitosa la relatividad especial y la mecánica cuántica. En este formalismo se interpretará la anomalía en el momento magnético del muón, $g-2$, como una corrección radiativa generada por una partícula escalar exótica. Las TCC permiten calcular secciones eficaces y anchos de decaimiento para partículas fundamentales o compuestas. Para calcular la amplitud invariante usamos diagramas de Feynman, que se pueden obtener de la densidad lagrangiana del modelo. Además, con el propósito de tener una formación sólida en el campo, estudiaremos la formulación de la ecuación de ondas relativista para los fermiones desarrollada por P.A. Dirac, mejor conocida como ecuación de Dirac. El trabajo consiste en calcular la contribución de un bucle a la función de vértice del electrón para generar una corrección al momento magnético anómalo del electrón.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo de grado propuesto pertenece a las áreas de estudio de la física de partículas y teoría cuántica de campos. Es un trabajo teórico.

3. CONTEXTO

El trabajo de grado requiere de fundamentos sólidos en física teórica. Desde mecánica clásica, dinámica relativista, electrodinámica clásica, mecánica analítica, mecánica cuántica, física de partículas y teoría de campos cuánticos. También se requiere una formación en física matemática, en particular tensores, transformada de Fourier, variable compleja y las materias que son prerequisites. Hasta el momento he cursado todas materias anteriormente mencionadas, y actualmente estoy cursando teoría cuántica de campos, mecánica cuántica I y espero terminar de cursar mecánica cuántica II el próximo semestre (Semestre A 2022).

4. ANTECEDENTES

Teniendo como punto de partida que el modelo estándar de partículas (ME) no logra explicar algunas observaciones como: el hecho de que hay mas partículas que anti-partículas en la naturaleza, la materia oscura, porque las cargas de las partículas son múltiplos enteros de una cantidad Fundamental, masas de neutrinos,...etc, se hace necesario una extensión del modelo estándar para explicar estos fenómenos. Desde el punto de vista teórico la pregunta: ¿Cuál es la extensión mínima electrodébil del modelo estándar (ME) con un contenido mínimo de fermiones? Por sí misma, esta pregunta es interesante y merece un estudio dedicado y sistemático. La literatura actual sobre los modelos mínimos abunda en ejemplos [16, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] pero hasta donde sabemos, no existe una parametrización de estos modelos en la literatura. Desde un punto de vista fenomenológico los modelos mínimos son útiles para explicar las anomalías aisladas en los experimentos de baja energía debido a la ausencia de fermiones exóticos a bajas energías (ejemplos de estas clases de anomalías se pueden ver en [17, 1, 18, 19]).

Para los modelos no universales, tal como está presente en la literatura [3, 4, 8, 9], el número total de parámetros aumenta, dando lugar a una gran variedad de soluciones.

El momento magnético anómalo del muón, se ha medido con una precisión sorprendente, y es actualmente una de las inconsistencias que mas se han estudiado entre los datos y las predicciones del Modelo Estándar (ME) en toda la física de partículas. Con los datos actuales, la discrepancia está a un nivel de $3,6\sigma$ [41], y se están realizando esfuerzos en los frentes experimental [42] y teórico [43, 44, 45, 46, 47, 48, 49] para mejorar la precisión tanto del valor medido como de la predicción del ME. Esta desviación del valor esperado del ME se ha utilizado como motivación para muchos modelos de nueva física [50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62].

Los integrantes del grupo de Altas Energías de la Universidad de Nariño junto a sus colaboradores han logrado consolidar un programa de investigación en física más allá del modelo estándar que a la fecha cuenta con varios trabajos [23, 24, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 14, 15, 30, 31, 63] algunos de estos trabajos han tenido un gran impacto y acumulan mas de 300 citas. El director de este trabajo *et al*, en el 2009 publicó [23] un artículo sobre constraints de experimentos de bajas energías sobre las masas de resonancias neutras extra en el modelo estándar, que a la fecha es su trabajo mas citado. En el 2011 publicó otro trabajo [26] sobre restricciones de colliders, este trabajo ha tenido varias secuelas y nos puso como referencia obligada en temas de restricciones experimentales sobre resonancias neutras extra. En el 2015 con colaboradores locales publicó un trabajo sobre cargas de resonancias neutras en modelos 331 [27]. En este trabajo también se reportaron restricciones de Colliders y de experimentos de bajas energías para estos modelos. El trabajo mas importante de este programa de investigación fue clasificación de modelos en E_6 . En este trabajo se introdujo formalmente la definición y se demostró que en E_6 todos los modelos tienen mínimo 3 y máximo 6 modelos

alternativos. Este resultado permitió reportar por primera vez todas las posibles cadenas de rompimiento de este grupo. Este artículo ha sido citado en las dos últimas versiones del *particle data group* [32]. Los últimos trabajos en esta línea de investigación están relacionados con los modelos mínimos [14, 15, 30, 31].

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar modelos de física más allá del modelo estándar. Para esto se propone un campo escalar exótico capaz de resolver el problema.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- El campo **ya viene dado** en la literatura, **en específico** es propuesto por Manfred Lindner(Heidelberg, Max Planck Inst.), Moritz Platscher(Heidelberg, Max Planck Inst.), Farinaldo S. Queiroz(Heidelberg, Max Planck Inst.) en su artículo [63], por tanto se prodecerá a manipular las expresiones correspondientes de acuerdo con el campo escalar escogido **y a** resolver el problema.
- Elaboración y sustentación del trabajo de grado.

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 de los distintos modelos de nueva física estudiados a lo largo del proyecto.

1. Se calculan los acoplamientos del modelo, en particular tomaremos como referencia los modelos reportados en: [33, 34, 35, 36, 33, 37, 38, 39, 40].
2. Actualizaremos el programa usado en las referencias [14, 15, 30, 31].
3. Haremos el análisis teórico para calcular el campo escalar que se elija.

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	FUENTE DE FINANCIACIÓN
COMPUTADOR	8 MESES	1.250.000	ESTUDIANTE
RESMA DE PAPEL BLOCK - CARTA	8 MESES	34000	ESTUDIANTE
IMPRESIONES	8 MESES	60000	ESTUDIANTE

8. CRONOGRAMA

El trabajo de grado, si no surgen imprevistos, se espera llevar a cabo en los cuatro meses que corresponden al décimo semestre de la carrera. El tiempo se ha dividido en tres partes siendo en todas ellas menester ir desarrollando la parte de la elaboración del manuscrito, así:

TAREAS PLANTEADAS	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4
Desarrollo teórico de la QED y QFT.	X			
Escogencia y análisis del mediador escalar e introducción a los cálculos para la solución del problema establecido.		X		
Solución del problema establecido.			X	
Escritura del trabajo de grado.	X	X	X	X

Referencias

- [1] R. Aaij *et al.* [LHCb Collaboration], Phys. Rev. Lett. **111**, 191801 (2013) doi:10.1103/PhysRevLett.111.191801 [arXiv:1308.1707 [hep-ex]].
- [2] Y. Tang and Y. L. Wu, Chin. Phys. C **42**, no. 3, 033104 (2018) doi:10.1088/1674-1137/42/3/033104 [arXiv:1705.05643 [hep-ph]].
- [3] X. G. He, G. C. Joshi, H. Lew and R. R. Volkas, Phys. Rev. D **43**, 22 (1991). doi:10.1103/PhysRevD.43.R22
- [4] X. G. He, G. C. Joshi, H. Lew and R. R. Volkas, Phys. Rev. D **44**, 2118 (1991). doi:10.1103/PhysRevD.44.2118
- [5] T. Appelquist, B. A. Dobrescu and A. R. Hopper, Phys. Rev. D **68**, 035012 (2003) doi:10.1103/PhysRevD.68.035012 [hep-ph/0212073].
- [6] M. Carena, A. Daleo, B. A. Dobrescu and T. M. P. Tait, Phys. Rev. D **70**, 093009 (2004) doi:10.1103/PhysRevD.70.093009 [hep-ph/0408098].
- [7] P. Langacker, Rev. Mod. Phys. **81**, 1199 (2009) doi:10.1103/RevModPhys.81.1199 [arXiv:0801.1345 [hep-ph]].
- [8] E. Salvioni, A. Strumia, G. Villadoro and F. Zwirner, JHEP **1003**, 010 (2010) doi:10.1007/JHEP03(2010)010 [arXiv:0911.1450 [hep-ph]].
- [9] 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]].
- [10] E. Ma, Phys. Rev. D **94**, no. 3, 031701 (2016) doi:10.1103/PhysRevD.94.031701 [arXiv:1606.06679 [hep-ph]].
- [11] C. Kownacki, E. Ma, N. Pollard and M. Zakeri, Phys. Lett. B **766**, 149 (2017) doi:10.1016/j.physletb.2017.01.013 [arXiv:1611.05017 [hep-ph]].
- [12] 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]].
- [13] G. Arcadi, T. Hugle and F. S. Queiroz, Phys. Lett. B **784**, 151 (2018) doi:10.1016/j.physletb.2018.07.028 [arXiv:1803.05723 [hep-ph]].
- [14] 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]].
- [15] R. H. Benavides, L. Muñoz, W. A. Ponce, O. Rodríguez and E. Rojas, arXiv:1812.05077 [hep-ph].
- [16] W. A. Ponce, Phys. Rev. D **36**, 962 (1987). doi:10.1103/PhysRevD.36.962
- [17] R. Pohl *et al.*, Nature **466**, 213 (2010). doi:10.1038/nature09250

- [18] A. J. Krasznahorkay *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, no. 4, 042501 (2016) doi:10.1103/PhysRevLett.116.042501 [arXiv:1504.01527 [nucl-ex]].
- [19] A. Heister, arXiv:1610.06536 [hep-ex].
- [20] F. Pisano and V. Pleitez, Phys. Rev. D **46**, 410 (1992) doi:10.1103/PhysRevD.46.410 [hep-ph/9206242].
- [21] P. H. Frampton, Phys. Rev. Lett. **69**, 2889 (1992). doi:10.1103/PhysRevLett.69.2889
- [22] S. F. Mantilla, R. Martinez and F. Ochoa, Phys. Rev. D **95**, no. 9, 095037 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.95.095037 [arXiv:1612.02081 [hep-ph]].
- [23] J. Erler, P. Langacker, S. Munir and E. Rojas, JHEP **0908**, 017 (2009) doi:10.1088/1126-6708/2009/08/017 [arXiv:0906.2435 [hep-ph]].
- [24] J. Erler, P. Langacker, S. Munir and E. Rojas, AIP Conf. Proc. **1200**, no. 1, 790 (2010) doi:10.1063/1.3327731 [arXiv:0910.0269 [hep-ph]].
- [25] J. Erler, P. Langacker, S. Munir and E. rojas, arXiv:1010.3097 [hep-ph].
- [26] J. Erler, P. Langacker, S. Munir and E. Rojas, arXiv:1108.0685 [hep-ph].
- [27] C. Salazar, R. H. Benavides, W. A. Ponce and E. Rojas, JHEP **1507**, 096 (2015) doi:10.1007/JHEP07(2015)096 [arXiv:1503.03519 [hep-ph]].
- [28] E. Rojas and J. Erler, JHEP **1510**, 063 (2015) doi:10.1007/JHEP10(2015)063 [arXiv:1505.03208 [hep-ph]].
- [29] O. Rodríguez, R. H. Benavides, W. A. Ponce and E. Rojas, Phys. Rev. D **95**, no. 1, 014009 (2017) doi:10.1103/PhysRevD.95.014009 [arXiv:1605.00575 [hep-ph]].
- [30] D. J. Blandon, D. A. Restrepo, W. A. Ponce and E. Rojas, arXiv:1812.03908 [hep-ph].
- [31] 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]].
- [32] M. Tanabashi *et al.* [Particle Data Group], Phys. Rev. D **98**, no. 3, 030001 (2018). doi:10.1103/PhysRevD.98.030001
- [33] A. J. Buras, F. De Fazio and J. Girrbach-Noe, JHEP **1408**, 039 (2014) doi:10.1007/JHEP08(2014)039 [arXiv:1405.3850 [hep-ph]].
- [34] A. J. Buras, F. Schwab and S. Uhlig, Rev. Mod. Phys. **80**, 965 (2008) doi:10.1103/RevModPhys.80.965 [hep-ph/0405132].
- [35] A. J. Buras, F. De Fazio, J. Girrbach and M. V. Carlucci, JHEP **1302**, 023 (2013) doi:10.1007/JHEP02(2013)023 [arXiv:1211.1237 [hep-ph]].

- [36] 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]].
- [37] W. A. Ponce, J. F. Zapata and D. E. Jaramillo, hep-ph/0102142.
- [38] L. A. Sanchez, W. A. Ponce and R. Martinez, Phys. Rev. D **64**, 075013 (2001) doi:10.1103/PhysRevD.64.075013 [hep-ph/0103244].
- [39] R. Martinez, W. A. Ponce and L. A. Sanchez, Phys. Rev. D **65**, 055013 (2002) doi:10.1103/PhysRevD.65.055013 [hep-ph/0110246].
- [40] W. A. Ponce, Y. Giraldo and L. A. Sanchez, AIP Conf. Proc. **623**, no. 1, 341 (2002) doi:10.1063/1.1489776 [hep-ph/0201133].
- [41] J. Beringer et al, (Particle Data Group), PRD 86, 010001 (2012).
- [42] R. M. Carey, K. R. Lynch, J. P. Miller, B. L. Roberts, W. M. Morse, Y. K. Semertzides, V. P. Druzhinin and B. I. Khazin et al., FERMILAB-PROPOSAL-0989; Andreas S. Kronfeld et al,[arxiv:1306.5009].
- [43] C. Aubin, T. Blum, M. Golterman, S. Peris, Phys.Rev. D86 (2012) 054509, [arXiv:1205.3695];
- [44] C. Aubin, T. Blum, M. Golterman, S. Peris, Phys.Rev. D88 (2013) 074505, [arXiv:1307.4701];
- [45] C. Aubin, T. Blum, M. Golterman, K. Maltman, S. Peris, [arXiv:1311.5504];
- [46] T. Blum, A. Denig, I. Logashenko, E. de Rafael, B. Lee Roberts, T. Teubner, G. Venanzoni, [arXiv:1311.2198]; M. Golterman, K. Maltman, S. Peris, [arXiv:1310.5928].
- [47] Fred Jegerlehner, Acta Phys.Polon. B44 (2013) 11, 2257-2266, [arXiv:1312.3978];
- [48] Andreas Nyffeler, [arXiv:1312.4804];
- [49] Matthias Steinhauser, [arXiv:1312.4688].
- [50] M. Adeel Ajaib, I. Gogoladze, Q. Shafi, C. Salih Un, [arXiv:1402.4918];
- [51] Hooman Davoudiasl, Hye-Sung Lee, William J. Marciano, [arXiv:1402.3620];
- [52] V. Rentala, William Shepherd, Shufang Su, Phys.Rev. D84 (2011) 035004, [arXiv:1105.1379];
- [53] Chris Kelso, P.R.D. Pinheiro, Farinaldo S. Queiroz, William Shepherd, [arXiv:1312.0051].
- [54] N. Anh Ky, H. N. Long, D. Van Soa,Phys.Lett. B486 (2000) 140-146,[hep-ph/0007010].
- [55] N. Anh Ky, H. N. Long, D. Van Soa,Phys.Lett. B486 (2000) 140-146,[hep-ph/0007010].

- [56] C.A. de S.Pires, P.S. Rodrigues da Silva, Phys.Rev. D64 (2001) 117701,[hep-ph/0103083].
- [57] P. Agrawal, Z. Chacko and C. B. Verhaaren, arXiv:1402.7369 [hep-ph].
- [58] Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Teppei Kitahara, Takahiro Yoshinaga, JHEP 1311 (2013) 013,[arXiv:1309.3065].
- [59] Masahiro Ibe, Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki, JHEP 1308 (2013) 067, [arXiv:1303.6995].
- [60] Lisa L. Everett, Gordon L. Kane, Stefano Rigolin, Lian-Tao Wang, Phys.Rev.Lett. 86 (2001) 3484-3487, [hep-ph/0102145].
- [61] Richard L. Arnowitt, Bhaskar Dutta, B. Hu, [hep-ph/0310103].
- [62] Stephen P. Martin, James D. Wells, Phys.Rev. D67 (2003) 015002, [hep-ph/0209309].
- [63] M. Lindner, M. Platscher and F. S. Queiroz, Phys. Rept. **731**, 1-82 (2018) doi:10.1016/j.physrep.2017.12.001 [arXiv:1610.06587 [hep-ph]].