

# Vectorlike Leptons and Inert Scalar Triplet: Lepton Flavor Violation, g-2 and Collider Searches

PhenoBR 2021

Álvaro Santos de Jesus  
Orientador: Farinaldo da Silva Queiroz

**Instituto Internacional de Física**  
**Universidade Federal do Rio Grande do Norte**

25/06/2021

# Sumário

## 1 Introdução

- O  $g-2$  do Múon
- Violação de Sabor Leptônico
- Modelos 3-3-1

## 2 Modelos Simplificados

- Tripleto Escalar Inerte
- Escalar Inerte com Léptons Exóticos

## 3 Resultados

- Tripleto Escalar Inerte
- Escalar Inerte com Léptons Exóticos

## 4 Conclusões

---

PHYSICAL REVIEW D **102**, 035004 (2020)

---

**Vectorlike leptons and inert scalar triplet: Lepton flavor violation,  
 $g-2$ , and collider searches**

A. S. de Jesus<sup>●,1,\*</sup> S. Kovalenko,<sup>2,†</sup> F. S. Queiroz,<sup>1,‡</sup> C. Siqueira<sup>●,1,§</sup> and K. Sinha<sup>3,||</sup>

<sup>1</sup>*International Institute of Physics, Universidade Federal do Rio Grande do Norte,  
Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal-RN 59078-970, Brazil*

<sup>2</sup>*Departamento de Ciencias Físicas, Universidad Andres Bello, Sazié 2212, Santiago, Chile*

<sup>3</sup>*Department of Physics and Astronomy, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma 73019, USA*

# O g-2 do Múon

Existe uma discrepância permanente entre as previsões teóricas e as medidas experimentais para o momento magnético do múon, sendo um sinal de física além do MP.

$$\Delta a_\mu = (261 \pm 78) \times 10^{-11} \quad (3.3\sigma) \quad [1, 2] - (2009);$$

$$\Delta a_\mu = (325 \pm 80) \times 10^{-11} \quad (4.05\sigma) \quad [3] - (2012);$$

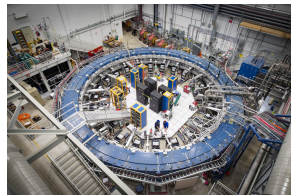
$$\Delta a_\mu = (287 \pm 80) \times 10^{-11} \quad (3.6\sigma) \quad [4] - (2013);$$

$$\Delta a_\mu = (377 \pm 75) \times 10^{-11} \quad (5.02\sigma) \quad [5] - (2015);$$

$$\Delta a_\mu = (313 \pm 77) \times 10^{-11} \quad (4.1\sigma) \quad [6] - (2017);$$

$$\Delta a_\mu = (270 \pm 36) \times 10^{-11} \quad (3.7\sigma) \quad [7] - (2018);$$

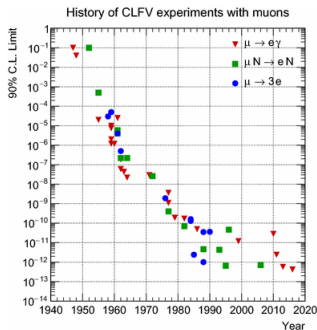
$$\Delta a_\mu = (251 \pm 59) \times 10^{-11} \quad (4.2\sigma) \quad [8] - (2021).$$



# Violação de Sabor Leptônico

Diversas extensões do MP predizem a existência de processos que violam sabor leptônico. O decaimento  $\mu \rightarrow e\gamma$  é o que possui o limite mais restritivo, obtido pela colaboração MEG [9], sendo dado por:

$$BR(\mu \rightarrow e\gamma) < 4.2 \times 10^{-13}.$$



# Modelos 3-3-1

Existe uma classe de modelos além do MP chamada de 3-3-1, onde há uma extensão no setor eletrofraco do MP, com  $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow SU(3)_L \times U(1)_N$ . Neste contexto, a estrutura de gauge desses modelos é dada por:

$$SU(3)_C \times SU(3)_L \times U(1)_N = [10, 11, 12].$$

# Modelos 3-3-1

Assim, a representação dos léptons e quarks de mão-esquerda é aumentada de dubletos para tripletos:

$$f_L^a = \begin{pmatrix} \nu^a \\ l^a \\ N^a \end{pmatrix}_L, \quad l_R^a, N_R^a; \quad Q_L^a = \begin{pmatrix} u^a \\ d^a \\ J^a \end{pmatrix}_L, \quad u_R^a, d_R^a, J_R^a. \quad (1)$$

Assim como o setor fermiônico, o setor bosônico também deve ser estendido, havendo 5 novos bósons de gauge e novos escalares.

# Modelos 3-3-1

Os modelos 3-3-1 são atraentes, pois são capazes de gerar respostas para uma série de problemas na física de partículas, tais como:

- i) Geração de férmions;
- ii) Matéria Escura;
- iii) Massa de Neutrinos;
- iv) Física de Baixas Energias, entre outros.



# Limites de colisores nos modelos 3-3-1

A extensão no setor de gauge gera 5 novos bósons de gauge, alguns sendo identificados como  $Z'$  e  $W^{\pm'}$ . Os novos bósons de gauge estão submetidos à limites vindos de experimentos, tal como colisores. Os limites mais fortes são sobre a massa do  $Z'$ :

$$\text{LHC 13 TeV: } M_{Z'} > 2 \text{ TeV}; \nu_\chi > 5 \text{ TeV} [13],$$

onde  $\nu_\chi$  é o valor esperado do vácuo do tripleto escalar que reduz os modelos 3-3-1 ao MP.

# Limites de colisores nos modelos 3-3-1

Utilizando códigos numéricos, como o Collider Reach ([14]) podemos determinar uma previsão desses limites para o HL-LHC e HE-LHC, obtendo:

$$\text{HL-LHC: } M_{Z'} > 4.5 \text{ TeV; } \nu_\chi > 11.4 \text{ TeV,}$$

$$\text{HE-LHC: } M_{Z'} > 8.9 \text{ TeV; } \nu_\chi > 22.5 \text{ TeV.}$$

# Tripleto Escalar Inerte

Como a simetria relevante nesse contexto é  $SU(3)_L \times U(1)_X$ , a adição de um tripleto escalar inerte (TEI) é trivial. A contribuição desse tripleto escalar para o  $g - 2$  do múon pode ser adicionada a partir do seguinte termo:

$$\mathcal{L} = \lambda_{ab} \bar{f}_{aL} \phi e_{bR}. \quad (2)$$

O TEI adquire massa a partir de um dos termos quárticos do potencial,  $\lambda \chi^\dagger \chi \phi \phi$ . Assim,  $M_\phi \sim \lambda v_\chi$ , onde novamente  $v_\chi$  é o VEV da quebra da simetria 3-3-1 ao MP.

# Escalar Inerte com Léptons Exóticos

Outra possibilidade para estudar os processos de interesse é com a adição de léptons carregados vectorlike. Neste caso, a análise é realizada a partir da lagrangeana abaixo:

$$\mathcal{L} = \lambda_{ab} \bar{E}_{aL} \phi e_{bR}, \quad (3)$$

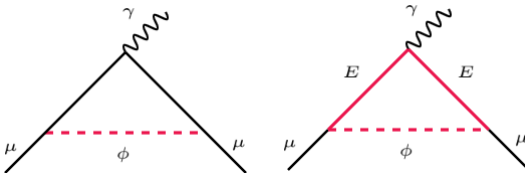
onde  $\phi$  é um singleto escalar e  $E_{aL}$  representa o lépton carregado vectorlike.

# Contribuição do escalar inerte para o $g-2$ do múon e violação de sabor leptônico

Um escalar inerte pode contribuir tanto para o  $g-2$  do múon quanto para o processo  $\mu \rightarrow e\gamma$ . A contribuição para o  $g-2$  do múon é dada por:

$$\Delta a_\mu = \frac{m_\mu^2}{8\pi^2 M_\phi^2} \int_0^1 dx \sum_b \frac{\lambda_{2b}^2 x^2 (1-x + \epsilon_b)}{(1-x)(1-\lambda^2 x) + x\epsilon_b \lambda^2} \quad (4)$$

onde  $\epsilon_b = m_b/m_\mu$  e  $\lambda = m_\mu/M_\phi$ .



# Contribuição do escalar inerte para o g-2 do múon e violação de sabor leptônico

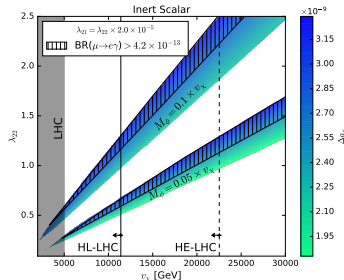
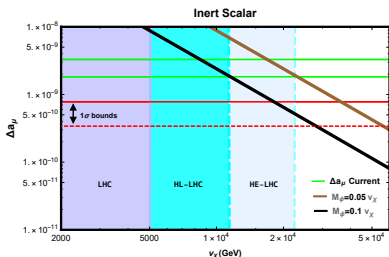
A contribuição do escalar inerte no Branching Ratio do processo  $\mu \rightarrow e\gamma$

$$BR(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3(4\pi)^3 \alpha_{em}}{4G_F^2} |A_{e\mu}^M|^2, \quad (5)$$

onde  $A^M$  é um fator de forma,

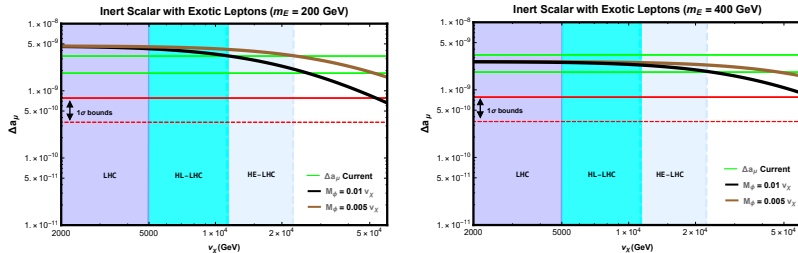
$$A_{ji}^M = \frac{1}{(4\pi)^2} \lambda_{fj} \lambda_{fi} l_{f,1}^{++}. \quad (6)$$

# Tripleto Escalar Inerte



**Figura:** Gráficos dos resultados para o TEI para os casos de  $g = 2$  do múon (esquerda) e sua complementariedade com CLFV (direita). Pode-se observar os limites nos acoplamentos de Yukawa vindos da CLFV, excluindo toda a região hachurada.

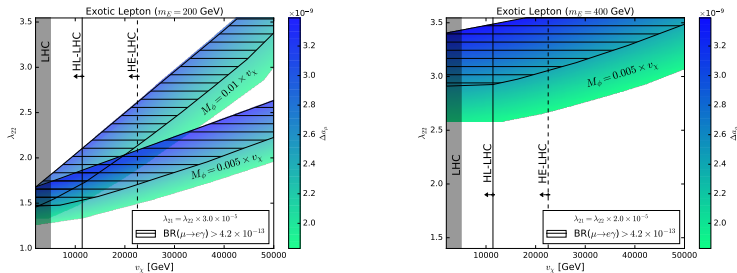
# Escalar Inerte com Léptons Exóticos



**Figura:** Resultados da contribuição do modelo com escalar inerte com léptons exóticos no  $g - 2$  do múon para  $m_E = 200$  GeV (esquerda) e  $m_E = 400$  GeV (direita).



# Escalar Inerte com Léptons Exóticos



**Figura:** Gráfico da relação entre o acoplamento de Yukawa  $\lambda_{22}$  e a escala de quebra de simetria  $v_\chi$  para o modelo com léptons exóticos para os casos com  $m_E = 200\text{GeV}$  (esquerda) e  $m_E = 400\text{GeV}$  (direita).

# Conclusões

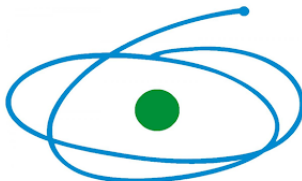
Neste trabalho, proveu-se cenários simplificados em que foi possível acomodar a anomalia no  $g - 2$  do múon em concordância com limites vindos de colisores vindos do novo bóson de gauge  $Z'$ .

Também analisamos a inclusão de efeitos de processos de CLFV no modelo. Contudo, essa inclusão se mostrou dependente da escolha dos acoplamentos de Yukawa, resultando em limites fortes sobre o modelo.

# Agradecimentos



INTERNATIONAL  
INSTITUTE OF  
PHYSICS  
Federal University of Rio Grande do Norte



C A P E S

# Referências I



Joaquim Prades, Eduardo de Rafael e Arkady Vainshtein. “The Hadronic Light-by-Light Scattering Contribution to the Muon and Electron Anomalous Magnetic Moments”. Em: **Adv. Ser. Direct. High Energy Phys.** 20 (2009), pp. 303–317. DOI: 10 . 1142/9789814271844\_0009. arXiv: 0901.0306 [hep-ph].



M. Tanabashi et al. “Review of Particle Physics”. Em: **Phys. Rev.** D98.3 (2018), p. 030001. DOI: 10 . 1103/PhysRevD . 98 . 030001.



M. Benayoun et al. “An Update of the HLS Estimate of the Muon  $g-2$ ”. Em: **Eur. Phys. J.** C73 (2013), p. 2453. DOI: 10 . 1140/epjc/s10052-013-2453-3. arXiv: 1210.7184 [hep-ph].



Thomas Blum et al. “The Muon ( $g - 2$ ) Theory Value: Present and Future”. Em: (2013). arXiv: 1311.2198 [hep-ph].

## Referências II



M. Benayoun et al. “Muon  $g-2$  estimates: can one trust effective Lagrangians and global fits?” Em: **Eur. Phys. J. C** 75.12 (2015), p. 613. DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3830-x. arXiv: 1507.02943 [hep-ph].



Fred Jegerlehner. “Muon  $g-2$  theory: The hadronic part”. Em: **EPJ Web Conf.** 166 (2018), p. 00022. DOI: 10.1051/epjconf/201816600022. arXiv: 1705.00263 [hep-ph].



Alexander Keshavarzi, Daisuke Nomura e Thomas Teubner. “Muon  $g-2$  and  $\alpha(M_Z^2)$ : a new data-based analysis”. Em: **Phys. Rev. D** 97.11 (2018), p. 114025. DOI: 10.1103/PhysRevD.97.114025. arXiv: 1802.02995 [hep-ph].



B. Abi et al. “Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm”. Em: **Phys. Rev. Lett.** 126 (14 abr. de 2021), p. 141801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.141801. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.126.141801>.

## Referências III



A. M. Baldini et al. “Search for the lepton flavour violating decay  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  with the full dataset of the MEG experiment”. Em: **Eur. Phys. J.** C76.8 (2016), p. 434. DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4271-x. arXiv: 1605.05081 [hep-ex].



F. Pisano e V. Pleitez. “An  $SU(3) \times U(1)$  model for electroweak interactions”. Em: **Phys. Rev.** D46 (1992), pp. 410–417. DOI: 10.1103/PhysRevD.46.410. arXiv: hep-ph/9206242 [hep-ph].



Robert Foot et al. “Lepton masses in an  $SU(3)_L \times U(1)_N$  gauge model”. Em: **Phys. Rev.** D47 (1993), pp. 4158–4161. DOI: 10.1103/PhysRevD.47.4158. arXiv: hep-ph/9207264 [hep-ph].



Hoang Ngoc Long. “The 331 model with right handed neutrinos”. Em: **Phys. Rev.** D53 (1996), pp. 437–445. DOI: 10.1103/PhysRevD.53.437. arXiv: hep-ph/9504274 [hep-ph].

# Referências IV



Alvaro S. de Jesus et al. “Dead or Alive? Implications of the Muon Anomalous Magnetic Moment for 3-3-1 Models”. [Em: \(2020\). arXiv: 2003.06440 \[hep-ph\]](#).



Andrea Thamm, Riccardo Torre e Andrea Wulzer. “Future tests of Higgs compositeness: direct vs indirect”. [Em: JHEP 07 \(2015\), p. 100. DOI: 10.1007/JHEP07\(2015\)100. arXiv: 1502.01701 \[hep-ph\]](#).