

Test de universalidad leptónica

Seminario para el semillero de investigación en altas energías

Oscar Rosero · Asesor: Eduardo Rojas, Ph.D

Marzo de 2022

Grupo de investigación en física de altas energías.
Departamento de Física.



Universidad de **Nariño**
TANTVM POSSVMVS QVANTVM SCIMVS

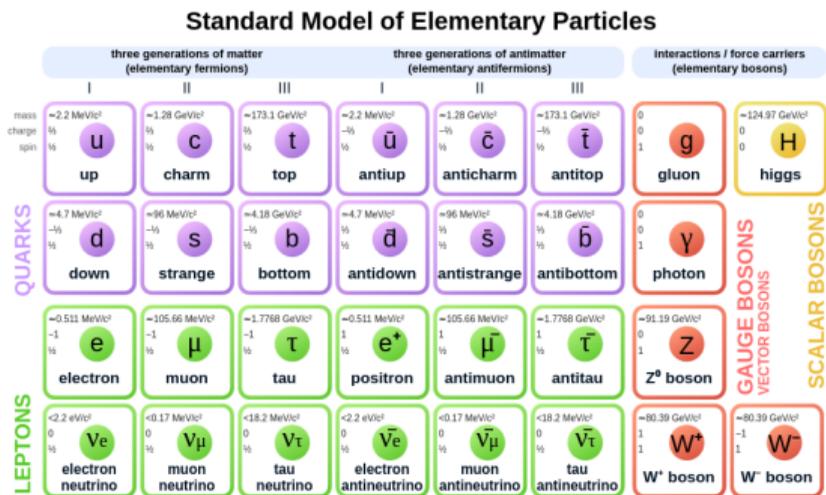
1. Breve introducción a la teoría de partículas elementales
2. Interacciones débiles
3. Anomalías de sabor en decaimientos semileptónicos
4. Conclusiones
5. Bibliografía



Breve introducción a la teoría de partículas elementales



El modelo estándar de partículas elementales



Fuerza	Magnitud	Teoría	Mediador
Fuerte	10	Cromodinámica	Gluón
EM	10 ⁻²	Electrodinámica	Fotón
Débil	10 ⁻¹³	GSW	W y Z
Gravitacional	10 ⁻⁴²	Relatividad Gral.	Gravitón

Fuente: Wikimedia.org

Generaciones o familias

Clasificación de leptones

	l	Q	m (MeV)
Primera generación	e	-1	0.510999
	ν_e	0	0
Segunda generación	μ	-1	105.659
	ν_μ	0	0
Tercera generación	τ	-1	1776.99
	ν_τ	0	0

Clasificación de quarks

	q	Q	m (MeV)
Primera generación	d	-1/3	7
	u	2/3	3
Segunda generación	s	-1/3	120
	c	2/3	1200
Tercera generación	b	-1/3	4300
	t	2/3	174000



Decaimientos y leyes de conservación

Es prácticamente un principio universal que *todas las partículas decaen a partículas más livianas, excepto que alguna ley de conservación se lo impida.*

- **Fotón** → estable debido a su masa cero.
- **Electrón** → estable debido a conservación de la carga. Partícula cargada más liviana.
- **Protón** → estable debido a la conservación del número bariónico. Barión más liviano.
- **Neutrinos** → neutrinos más livianos protegidos por conservación del número leptónico.

Existen diferentes modos de decaimiento ("*branching ratios*"), e.g.:

$$K^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ + \nu_\mu & 64 \% \\ \pi^+ + \pi^0 & 21 \% \\ \pi^+ + \pi^+ + \pi^- & 6 \% \\ e^+ + \nu_e + \pi^0 & 5 \% \end{cases}$$



Decaimientos y leyes de conservación

- Conservación de la masa-energía: $E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$.
- Cada especie inestable tiene un tiempo de vida característico τ , e.g.
 $\tau_{\mu^-} = 2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$, $\tau_{\pi^+} = 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$, $\tau_{\pi^0} = 8.3 \times 10^{-17} \text{ s}$.
- Tiempo de vida medio ("*half-life*"): tiempo para que la mitad de las partículas de una muestra grande decaigan

$$t_{1/2} = (\ln 2)\tau.$$

- Propósito de la teoría de partículas elementales \Rightarrow calcular tiempos de vida, "branching ratios" y secciones eficaces.



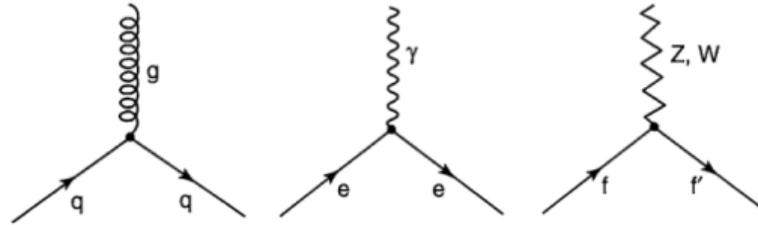
Leyes dinámicas de conservación

1. **Carga:** Todas las interacciones conservan carga eléctrica. W 's pueden cargar la diferencia.
2. **Color:** Interacciones EM y débil no afectan el color. Gluones pueden cargar la diferencia. Conservación: cero a la entrada, cero a la salida.
3. **Número bariónico:** (1 para bariones, -1 para antibariones, 0 para todo lo demás) Número total de quarks es constante en un vértice.
4. **Número leptónico:** Interacción fuerte no toca leptones. EM deja iguales los leptones. Int. Débil deja número leptónico, pero puede cambiar el leptón. μ , τ y e separados en general. Oscilaciones de neutrinos parecen indicar que esto no es universal.
5. **Sabor:** Conservado en interacciones fuertes, pero no en interacciones débiles.



- **GSW:** Unificación electrodébil. Inicia con 4 mediadores no-masivos. 3 de ellos adquieren masa mediante mecanismo de Higgs.
- **SU(5):** Grupos Gauge $SU(3) \otimes SU(2) \otimes SU(1)$. Unificación de las tres fuerzas. Implicaciones fenomenológicas que lo vuelven inviable.
- **Pati-Salam:** Cuatro colores de quarks. Cuarto color asociado a los leptones. Predice existencia de corrientes derechas.
- **Cuerdas:** Unificación de las cuatro fuerzas.

Diagramas de Feynman



Vértices fundamentales para las tres interacciones.

Elementos:

- Líneas externas \Rightarrow partículas reales susceptibles de ser detectadas.
- Líneas internas \Rightarrow partículas virtuales que contribuyen un propagador según la teoría.
- Vértices \Rightarrow Contribuyen un factor de vértice que incluye constante de acoplamiento.

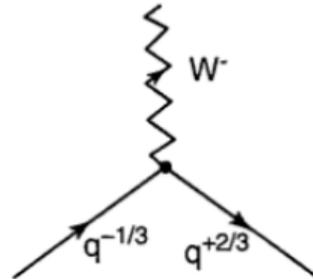
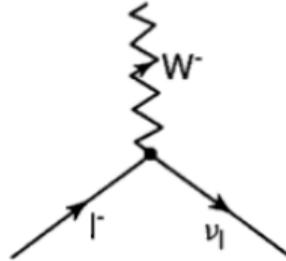
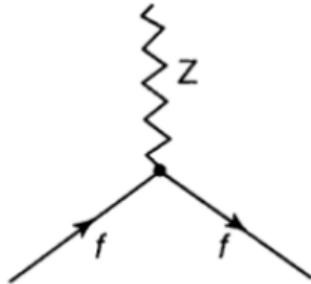
Interacciones débiles



Interacciones débiles

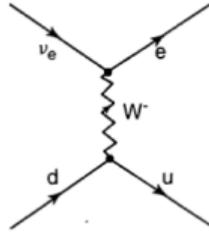
- “Cosa” que produce las interacciones débiles \Rightarrow no nombre específico...
Carga débil \rightarrow todos los quarks y leptones la portan.
- Dos tipos:

{	Cargadas $\rightarrow W^+, W^-$	(80.40 GeV)
	Neutras $\rightarrow Z$	(91.18 GeV)
- Violación de paridad (simetría espejo) firma distintiva.
- Cambio de sabor en interacciones cargadas.

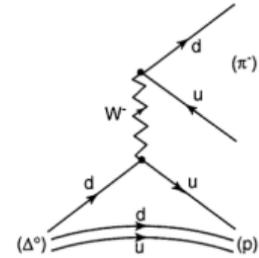


Vértices débiles fundamentales (Fuente: Griffiths, 2008)

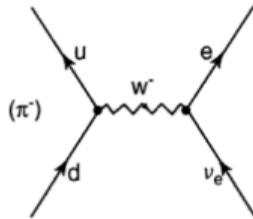
Decaimientos semileptónicos y hadrónicos puros



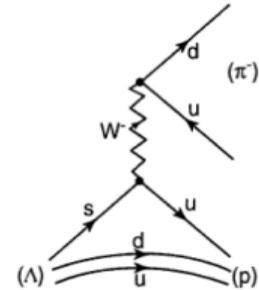
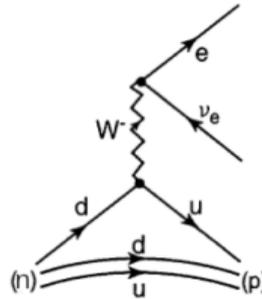
Dispersión débil semileptónica (Fuente: [1]).



Decaimiento hadrónico puro (Fuente: [1]).



Decaimientos semileptónicos (Fuente: [1]).



Decaimiento hadrónico con cambio de extrañeza (Fuente: [1]).

Acoplamiento de la interacción débil

Propagador:

$$\frac{-i(g_{\mu\nu} - q_{\mu}q_{\nu}/M^2 c^2)}{q^2 - M^2 c^2}$$

Factor de vértice:

$$\frac{ig_w}{2\sqrt{2}}\gamma^{\mu}(1 - \gamma^5)$$

Pares acoplados:

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$$

Matriz CKM:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Valores experimentales
matriz CKM:

$$\begin{pmatrix} 0.974 & 0.227 & 0.004 \\ 0.227 & 9.973 & 0.042 \\ 0.008 & 0.042 & 0.999 \end{pmatrix}$$

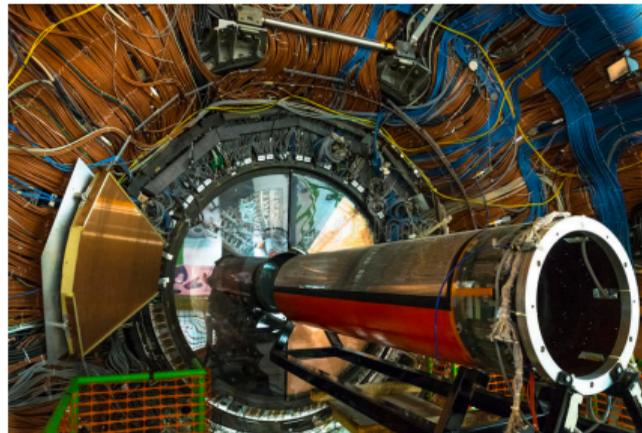


Anomalías de sabor en decaimientos semileptónicos



El acoplamiento de todos los leptones a los bosones gauge es independiente del sabor.

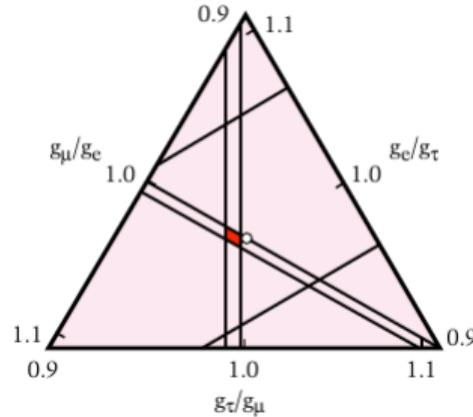
- Electrón, muón y tau son idénticos, excepto por su masa.
- Comparación de tasas de decaimiento de muones y taus a electrones. Razón proporcional a $(m_\tau/m_\mu)^5 (g_\tau/g_\mu)^2$.



Detector de LHCb.

Nueva física?

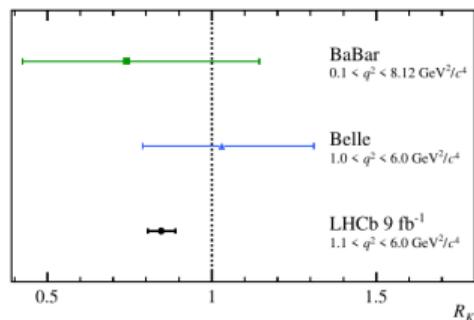
- Insinuación de nueva física más allá del modelo estándar: anomalía en la desintegración del mesón $B \rightarrow$ posible violación de universalidad leptónica.



"Triángulo de universalidad"(Fuente: Patterson, 1995).

Anomalías en el decaimiento del mesón B

- Mediciones en LHCb, BaBar y Belle de los decaimientos $B \rightarrow Kl^+l^-$ y $B \rightarrow K^*l^+l^-$.
- R_K, R_{K^*} : razón de las fracciones de ramificación (branching ratio).

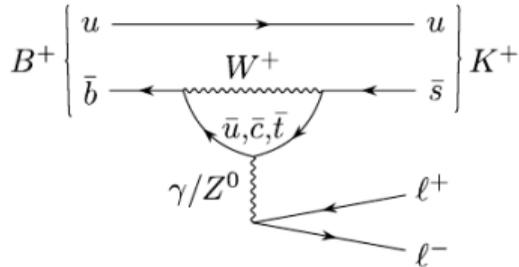


Mediciones de R_K en diferentes experimentos (Fuente: LHCb, 2021).

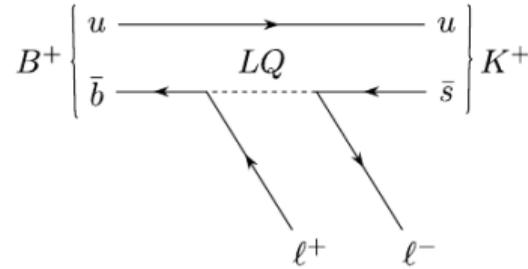
$$R_K[q_{\min}^2, q_{\max}^2] = \frac{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} dq^2 d\Gamma(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)/dq^2}{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} dq^2 d\Gamma(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)/dq^2}. \quad (1)$$

- Modelo estándar predice resultado ~ 1 . LHCb: $R_K = 0.864_{-0.041}^{+0.044}$, discrepancia de 3.1 desv. est.

Modelos de nueva física



Contribución del ME al decaimiento de B^+ .



Posible contribución de nueva física que involucra un leptoquark (LQ).

- Nuevas partículas como los leptoquarks o el Z' .
- Nuevos modelamientos de las simetrías en QFT.
- Mezclas de quarks y leptones con nuevos fermiones vectoriales.

Conclusiones



Conclusiones

- El modelo estándar es una exitosa descripción de la materia y sus interacciones.
- Resultados de nuevos experimentos sugieren que el modelo estándar debe ampliarse para dar cuenta de fenómenos recientemente observados que son incongruentes con algunas de sus predicciones teóricas.
- Las anomalías de sabor en decaimientos semileptónicos son una evidencia convincente de la existencia de física más allá del modelo estándar.
- El planteamiento de modelos de nueva física es un área de gran interés para los físicos.
- Varios modelos de nueva física pueden dar cuenta de los fenómenos observados, pero aún queda un largo camino para lograr una comprensión completa de la estructura del universo.



Bibliografía





David Griffiths.

Introduction to elementary particles.

2008.



Roel Aaij et al.

Test of lepton universality in beauty-quark decays.

3 2021.



Bartosz Fornal et al.

Left-Right SU(4) Vector Leptoquark Model for Flavor Anomalies.

Phys. Rev. D., 99:055025, 2019.



-  J. Ritchie Patterson.
Lepton Universality.
Beamline, 25-1:7, 1995.
-  Wei Wang and Shuai Zhao.
Implications of the R_K and R_{K^*} anomalies.
Chinese Physics C, 42:13105, 2018.

GRACIAS

