

# Búsqueda de nueva física en decaimiento leptónico de los mesones $D^+$ y $D^+_s$ usando los últimos resultados presentados por la colaboración BESIII

David Yves Ghislain Delepine<sup>1</sup>, Víctor Manuel López Ramos<sup>1</sup>, Jorge Luis Vázquez Cervantes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Campus León, León 37150, México

## Resumen

Los leptones son ciertos tipos de partículas descritas dentro del Modelo Estándar, las cuales podemos agrupar según su sabor en tres familias o generaciones: electrón, muon y tau. Como la única diferencia entre los leptones de diferentes generaciones es la masa, no es posible distinguir entre unos sabores u otros en aquellos procesos físicos en los que masa no juegue un papel relevante. Esto es a lo que se le conoce como universalidad leptónica. En años recientes varios experimentos han arrojado evidencia de una posible violación en la universalidad leptónica en el estudio de decaimiento de los mesones B, hadrón compuesto de un quark b y otro anti-quark d, en muones [5]. En este artículo se estudiaron los decaimientos leptónicos de los mesones  $D^+$  y  $D^+_s$ , constituidos de un quark c y respectivamente de un anti-quark d o anti-quark s, con los datos obtenidos recientemente por BESIII, se compararon estos valores con los predichos teóricamente por el Modelo Estándar, y con esto se consiguió acotar los valores que deberían tener los coeficientes de Wilson asociado a nuevas interacciones para reproducir los resultados experimentales de BESIII.

Palabras clave: Decaimiento Leptónico; Coeficientes del Wilson.

## Introducción

El Modelo Estándar es la teoría física que nos ayuda a comprender el comportamiento de las partículas fundamentales, y es sin lugar a duda la teoría científica más precisa jamás creada. A pesar de esto, sabemos que no nos da una descripción completa del universo, pues para empezar no describe lo que sucede con las interacciones gravitacionales. Los dos tipos básicos de partículas que podemos encontrar son los bosones y los fermiones. Los primeros son los mediadores de fuerza o partículas portadoras de las interacciones fundamentales, mientras que los segundos son el principal componente del que está constituida la materia. Los fermiones a su vez se dividen en quarks y leptones. Algo interesante acerca de los fermiones, y de lo que aún desconocemos la razón fundamental para ello, es que existen tres copias de cada fermión, siendo la masa la única diferencia entre ellas. Esto permite agrupar los fermiones del Modelo Estándar en tres "sabores" o "generaciones", términos que los físicos han introducido para designar a cada una de las tres copias. Por ejemplo, el electrón, es un fermión que cuenta con dos hermanos más pesados: el muón y el tau.

La masa del electrón es de unos 511 KeV, mientras que la del muón es de 106 MeV y la del tau de unos 1.8 GeV. Sin embargo, el resto de sus propiedades son exactamente iguales. Como la única diferencia entre los fermiones de diferentes generaciones es la masa, no es posible distinguir entre unos sabores u otros en aquellos procesos físicos en los que masa no juegue un papel relevante. Para el caso de los leptones, esto es a lo que se le conoce como universalidad leptónica. Explorando los límites de la universalidad leptónica estamos explorando los límites del Modelo Estándar, y es por esta razón que diversos experimentos han buscado durante décadas procesos que no respeten esta universalidad, pues esto nos revelaría los puntos débiles de nuestra mejor teoría, encontrando quizás nuevas partículas o fuerzas no predichas por el Modelo Estándar, es decir, encontraríamos física más allá del Modelo Estándar, física nueva.

Es con la inspiración de esta búsqueda por física nueva, que en este artículo hacemos un estudio de los procesos de los mesones  $D^+$  y  $D^+_s$ , donde se usaron los datos que presentó la colaboración BESIII. Con estos datos acotamos los valores de los llamados "Coeficientes de Wilson", que es en donde se encuentra codificada la llave que nos abriría la puerta hacia la nueva física.

## Desarrollo

Los mesones cargados formados a partir de un quark  $c$  y antiquark  $d(s)$  pueden descomponerse en un par leptón-neutrino cuando estos objetos se aniquilan a través de un bosón  $W^+$  virtual. La figura 1 ilustra este proceso para la desintegración puramente leptónica de un mesón  $D_{(s)}^+$ .

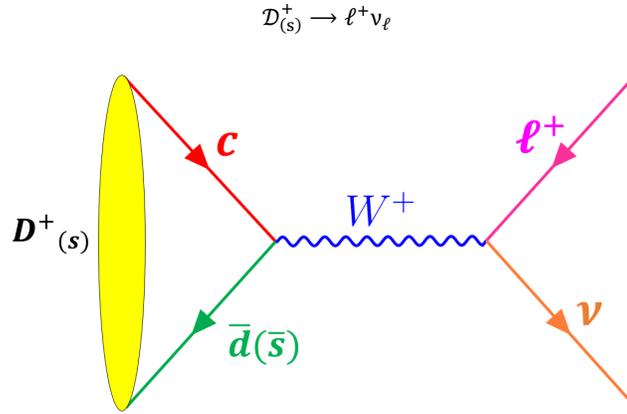


Figura 1. Diagrama de Feynman del proceso de aniquilación de las desintegraciones leptónicas  $D_{(s)}^+$  puras en el modelo estándar.

De acuerdo con este diagrama de Feynman y a la teoría del Modelo Estándar nuestro hamiltoniano de interacción es:

$$H_I = \frac{g_W^2}{2m_W^2} \left( \bar{\Psi}_{d(s)} \gamma^\alpha \frac{1}{2} (1 - \gamma^5) \Psi_c \right) \left( \bar{\Psi}_l \gamma^\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma^5) \Psi_\nu \right)$$

Donde  $g_W$  es la constante de acoplamiento y  $m_W$  es la masa del bosón  $W$ . Con dicho hamiltoniano de interacción podemos calcular la tasa de decaimiento para este tipo de proceso que resulta ser:

$$\Gamma_{D_{(s)}^+}^{SM} = |V_{cd(s)}|^2 f_{D_{(s)}^+}^2 \frac{G_F^2}{8\pi} m_\ell^2 m_{D_{(s)}^+} \left( 1 - \frac{m_\ell^2}{m_{D_{(s)}^+}^2} \right)^2$$

donde  $|V_{cd(s)}|$  es el elemento de la matriz Cabbibo-Kobayashi-Maskawa (CKM),  $f_{D_{(s)}^+}$  es la constante de decaimiento definida por  $\langle 0 | (\bar{\Psi}_{d(s)} \gamma^\alpha (1 - \gamma^5) \Psi_c) | D_{(s)}^+(q) \rangle = -if_{D_{(s)}^+} q^\alpha$ ,  $G_F$  es la constante de Fermi,  $m_l$  y  $m_{D_{(s)}^+}$  son las masas del leptón y el mesón  $D_{(s)}^+$  respectivamente. Para los procesos de nuestro interés trabajaremos con los leptones  $\mu$  y  $\tau$ .

Una vez teniendo este resultado de dicha tasa de decaimiento predicha por el Modelo Estándar, se usó para lo siguiente; se analizó el rango de las constantes del Wilson, las cuales son predictores a nueva física, para ellos se recurrió a la tasa de decaimiento analizada en el artículo [1], donde dicha tasa de decaimiento tiene la siguiente expresión:

$$\Gamma_{D_{(s)}^+}^{SM+NP} = \frac{[G_F f_{D_{(s)}^+} (m_{D_{(s)}^+}^2 - m_\ell^2)]^2}{8\pi (m_{D_{(s)}^+})^3} \left[ |V_{cd(s)}|^2 m_\ell^2 + \frac{m_\ell^2 [C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,LL} - C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,RL}]}{2\sqrt{2}} + \frac{m_{D_{(s)}^+}^2 [C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,RR} - C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,LR}]}{2\sqrt{2}(m_c + m_{d(s)})} \right]^2$$

donde  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,LL}$ ,  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,RL}$  son los coeficientes de Wilson vectoriales,  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,RR}$ ,  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,LR}$  son los coeficientes de Wilson escalares y  $m_c$ ,  $m_d$ ,  $m_s$  son las masas de los quarks charm, down y strange respectivamente.

Para conocer las cotas de dichos coeficientes lo que se hizo fue utilizar el branching ratio  $\mathcal{B}_{SM+NP} = \Gamma_{D_{(s)}^+}^{SM+NP} / \Gamma_{total}$ , para este modelo que predice nueva física, de la siguiente manera:

$$A \leq \mathcal{B}_{SM+NP}(D_{(s)}^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell) \leq B$$

donde  $\Gamma_{total}$  es igual al inverso del tiempo de vida del mesón correspondiente y dichas cotas  $A$  y  $B$  para estos branching ratios son precisamente los resultados experimentales dados por BESIII y Particle Data Book (PDB).

En la siguiente tabla mostramos las cotas experimentales de los branching ratios utilizadas para cada proceso tratado y sus respectivas referencias y además mostramos los branching ratios predichos por el Modelo Estándar, los cuales se calcularon con los datos dados en [4]:

Decaimiento	$\mathcal{B}_{SM}$ Teórico	$\mathcal{B}_{EXP}$ Experimental	Referencia de $\mathcal{B}_{EXP}$
$\mathcal{D}_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$5.4647 \times 10^{-3}$	$(5.35 \pm 0.13 \pm 0.16) \times 10^{-3}$	arXiv:2105.07178 [hep-ex]
$\mathcal{D}_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$	$5.3261 \times 10^{-2}$	$(5.27 \pm 0.10 \pm 0.12) \times 10^{-2}$	BESIII Preliminary presentado en la conferencia CHARM 2020 (mayo 2021)
$\mathcal{D}^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$	$1.006 \times 10^{-3}$	$(1.20 \pm 0.24 \pm 0.12) \times 10^{-3}$	PDB
$\mathcal{D}^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$3.91 \times 10^{-4}$	$(3.74 \pm 0.17) \times 10^{-4}$	PDB

Tabla 1. Muestra los distintos decaimientos trabajados con sus respectivas  $\mathcal{B}_{SM}$ ,  $\mathcal{B}_{EXP}$  branching ratios teórico y experimental respectivamente y las referencias de donde se tomaron los  $\mathcal{B}_{EXP}$

La forma en la cual se calcularon los coeficientes  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,LL}$ ,  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,RL}$ ,  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,RR}$ ,  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,LR}$ , fue haciendo la suposición de que 3 de ellas son nulas, lo que significa que los coeficientes sean independientes y no podemos tener cancelación entre las diferentes contribuciones de cada coeficiente de Wilson, para así poder determinar una a una en cada proceso. Los resultados para cada proceso se muestran en la siguiente tabla:

Decaimiento	$C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,LL}$	$C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,RL}$	$C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,RR}$	$C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,LR}$
$\mathcal{D}_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	[-0.081,0.023]	[-0.023,0.081]	[-0.003,0.0008]	[-0.0008,0.003]
$\mathcal{D}_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$	[-0.055,0.026]	[-0.026,0.055]	[-0.035,0.016]	[-0.016,0.035]
$\mathcal{D}^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$	[-0.017,0.058]	[-0.058,0.017]	[-0.022,0.075]	[-0.075,0.022]
$\mathcal{D}^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	[-0.0139,0]	[0,0.0139]	[-0.001,0]	[0,0.001]

Tabla 2. Muestra los rangos de los coeficientes  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,LL}$ ,  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{V,RL}$ ,  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,RR}$ ,  $C_{d(s)cl\nu_\ell}^{S,LR}$  obtenidas para cada proceso trabajado

## Conclusión

Los datos presentados por BESIII son compatible con lo predicho por el Modelo Estándar, pero permiten valores para los coeficientes de Wilson describiendo física nueva que sean diferentes entre tau y muon. En este trabajo se logró acotar el valor para cada coeficiente de Wilson para que las contribuciones provenientes de física nueva sean a dentro de los valores experimentales reportados por BESIII y PDB. Con esto pudimos notar que el rango de valores para los coeficientes de Wilson que calculamos es menor a los mencionados en el artículo [1]. Esto nos lleva a pensar que con ayuda de más experimentos y la recopilación de más datos, la incertidumbre en dichos coeficientes disminuya aún más.

## Referencias

- [1] J. Barranco et al. / Physics Letters B 731 (2014) 36–42
- [2] M. Ablikim et al. (BESIII collaboration). arXiv:2105.07178 [hep-ex]
- [3] M. Ablikim et al. (BESIII collaboration). BESIII Preliminary
- [4] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Particle Data Book, Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020) and 2021 update recuperado el día 18 de julio de 2021 de PDG
- [5] G. Ciezarek<sup>1</sup>, M. Sevilla, B. Hamilton, R. Kowalewski, T. Kuhr, V. Luth y Y. Sato, A Challenge to Lepton Universality in B Meson Decays. arXiv:1703.01766 [hep-ex]