

Implementación del algoritmo de identificación de quarks charm del experimento CMS en búsquedas de nueva física a través de canales

$$W'(\rightarrow \tau\nu_\tau) + b/c$$

Sebastián Alejandro Reyes Usma
Universidad de los Andes
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá, Colombia

Director: PhD. Andrés Flórez
Universidad de los Andes
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Grupo de Altas Energías
Bogotá, Colombia

Resumen

Esta propuesta de tesis detalla la implementación y la medición del desempeño del algoritmo de identificación de quarks *charm* para el experimento CMS. El algoritmo está diseñado para análisis con jets de sabor en el estado final, donde su aplicación busca reducir fondos y aumentar la sensibilidad de la búsqueda. El objetivo es cuantificar la eficiencia del algoritmo y sus incertidumbres con datos del Run 2 del LHC. El desempeño se medirá a través del estudio de eventos de control de producción $Z(\rightarrow \mu\mu) + c$ para obtener una calibración con los datos del colisionador.

Este trabajo está motivado por la búsqueda del bosón vectorial W' en el canal $W'(\rightarrow \tau\nu_\tau) + b/c$. Los modelos que postulan un W' con acoples a la segunda y tercera generación de fermiones, ofrecen una explicación a las anomalías de la universalidad leptónica reportadas en las razones de desintegración $R(D)$ y $R(D^*)$.

Abstract

This thesis proposal details the implementation and performance measurement of the charm quark identification algorithm for the CMS experiment. The algorithm is designed for analyses with flavor jets in the final state, where its application seeks to reduce backgrounds and increase search sensitivity. The objective is to quantify the algorithm's efficiency and its uncertainties using data from LHC Run 2. The performance will be measured through the study of $Z(\rightarrow \mu\mu) + c$ production control events to obtain a calibration with collider data.

This work is motivated by the search for the W' vector boson in the $W'(\rightarrow \tau\nu_\tau) + b/c$ channel. Models that postulate a W' with couplings to second and third-generation fermions offer an explanation for the lepton universality anomalies reported in the $R(D)$ and $R(D^*)$ decay ratios.

I. INTRODUCCIÓN

El Modelo Estándar (ME) resume nuestro entendimiento de las partículas fundamentales y sus interacciones. Sin embargo, a pesar de su éxito en la predicción y descripción de numerosos fenómenos, el ME no es completo y deja varias preguntas sin respuesta. Estas incluyen la asimetría materia-antimateria en el universo, la naturaleza de la materia oscura y las diferencias en las masas de las partículas fundamentales. Además, el ME no incorpora la gravedad [1].

Para responder las preguntas abiertas, se han propuesto varias extensiones al ME. Estas teorías proponen nuevas partículas y mecanismos con el fin de proveer respuestas y explicar algunas tensiones observadas entre el ME y observaciones experimentales. La validación de estas hipótesis depende de su

concordancia con resultados experimentales. El experimento CMS (Compact Muon Solenoid) del LHC (Large Hadron Collider), en el laboratorio CERN (European Organization for Nuclear Research), hace parte de un gran número de experimentos que buscan física más allá del ME en la actualidad [2].

El modelo de extensión del ME que es de interés para este trabajo está relacionado con la producción hipotética de un bosón vectorial cargado, conocido como W' [3, 4]. Este tipo de bosones viene siendo estudiado por el grupo de física de altas energía de la Universidad de los Andes, a nivel teórico y experimental. Específicamente, el grupo se ha concentrado en escenarios donde el bosón W' tiene acoples preferentes a fermiones de segunda y tercera generación. Estos bosones son teorizados en múltiples modelos que extienden el ME y surgen como una posible explicación a la tensión experimental de la universalidad

dad leptónica en procesos de desintegración de mesones B a mesones D o D^* .

El diagrama de Feynman presentado en la Figura 1 ilustra el proceso de desintegración de un mesón $\bar{B}$ a un mesón D^* . Note que el quark bottom (b) se desintegra en un quark charm (c) mediante un bosón W ; proceso descrito por el ME ($W + b \rightarrow \tau/\mu + c + \bar{\nu}$). Ahora bien, la extensión del ME sugiere añadir al diagrama presentado una réplica de este, en la que el papel del W sea desempeñado por el W' en un proceso análogo ($W' + b \rightarrow \tau/\mu + c + \bar{\nu}$) [5–15].

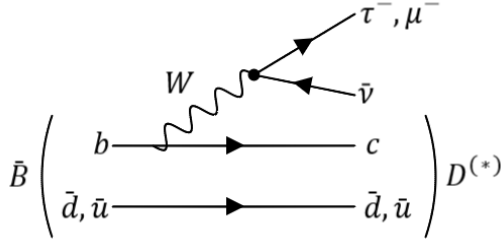


Figura 1: Diagrama de Feynman de la desintegración de un mesón $\bar{B}$ en un mesón $D^{(*)}$ por medio del bosón W .

La hipótesis de universalidad leptónica postula que las interacciones entre corrientes cargadas de la interacción débil no hacen distinción entre las diferentes generaciones de leptones. En otras palabras, la probabilidad de desintegración a leptones, ya sean electrones, muones o taus, debería ocurrir con la misma proporción, debido a que se tiene el mismo tipo de acople entre los leptones con el bosón W . Sin embargo, se han observado discrepancias en estas proporciones al comparar las medidas de desintegración de mesones B a mesones D o D^* con un tau asociado en el estado final, con respecto a electrones y muones, en experimentos como BaBar, Belle y LHCb.

Actualmente, la diferencia entre los resultados experimentales y las predicciones del ME se encuentran alrededor de 3.2σ en significancia estadística [15–23]. Las medidas han consistido en determinar la razón de las tasas de ramificación, conocida como *branching ratio*, identificadas como $R(D)$ y $R(D^*)$:

$$R(D) = \frac{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D\tau^-\bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D\ell^-\bar{\nu}_\ell)}, \quad (1)$$

$$R(D^*) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)}\tau^-\bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)}\ell^-\bar{\nu}_\ell)}. \quad (2)$$

Las predicciones del ME vienen dadas por [24–26]:

$$R(D)_{\text{ME}} = 0,298 \pm 0,003, \quad (3)$$

$$R(D^*)_{\text{ME}} = 0,255 \pm 0,004. \quad (4)$$

Sin embargo, difieren de los valores experimentales promedio observados por los diferentes experimentos (BABAR, Belle y LHCb) [27]:

$$R(D)_{\text{Exp}} = 0,338 \pm 0,026_{\text{stat}} \pm 0,014_{\text{syst}}, \quad (5)$$

$$R(D^*)_{\text{Exp}} = 0,295 \pm 0,010_{\text{stat}} \pm 0,010_{\text{syst}}, \quad (6)$$

Las comparaciones de las tasas de desintegración sugieren la existencia de física más allá del ME, por ejemplo, modelos basados en la existencia del bosón W' . Algunos de estos modelos, consideran como los principales canales de producción los mostrados en la Figura 2. Es de especial interés el canal de fusión de gluon-gluon (gg), el cual produce un quark charm en el estado final. La presencia del quark charm permite reducir de manera significativa los procesos de fondo provenientes del ME. Adicionalmente, se puede estudiar procesos de desintegración del bosón W' a un tau y un neutrino. Note que a través de este tipo de estado final, es posible tener un canal en el cual se puede medir estados con acople preferente a fermiones de segunda y tercera generación. Sin embargo, los algoritmos de reconstrucción e identificación de quarks charm en el LHC son relativamente recientes y han presentado retos importantes a nivel experimental.

Es por ello que es fundamental entender, implementar y probar la eficiencia, moldeamiento a nivel de simulación y la concordancia con los datos experimentales de dichos algoritmos, antes de ser usados en una búsqueda de nueva física.

Habiendo establecido una razón para estudiar el bosón W' con el requisito de un quark charm, pasamos a detallar la metodología que sustenta este proyecto.

Nuestro enfoque se basa en gran medida en técnicas computacionales, utilizando datos de CMS. Estos datos abarcan dos categorías distintas: simulaciones Monte Carlo (MC) que procuran reproducir procesos del ME y datos experimentales tomados por el experimento CMS producto de colisiones protón-protón del LHC.

El propósito de este trabajo es implementar el nuevo algoritmo de identificación del quark charm del experimento CMS, junto con las eficiencias y correcciones recomendadas, en el código de análisis de búsquedas de señales provenientes de $W'(\rightarrow \tau\nu_\tau) + b/c$. Los resultados del algoritmo será comprobado por medio de un proceso de referencia (*standard candle*), de eventos $Z(\rightarrow \mu\mu) + c$. Los estudios se realizarán usando datos del Run 2 del LHC, recolectados durante 2016-2018, con una luminosidad integrada de 137 fb^{-1} [28, 29]. Una vez de halla verificado el desempeño del algoritmo de identificación, a través del

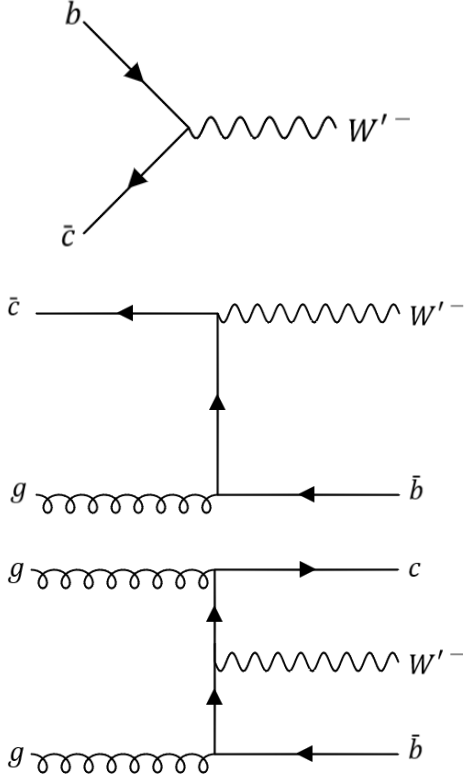


Figura 2: Diagramas de Feynman representativos de la producción del bosón vectorial W' .

estudio de la concordancia de las distribuciones cinemáticas y topológicas de interés, se procederá a integrar el módulo en el código de análisis de CMS para las búsqueda $W'(\rightarrow \tau\nu_\tau) + b/c$.

II. OBJETIVO GENERAL

Implementar y determinar el desempeño del algoritmo de identificación de quarks charm del experimento CMS, para ser usando en la búsqueda de física más allá del ME a través del proceso $W'(\rightarrow \tau\nu_\tau) + b/c$.

III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica anotada sobre diferentes modelos teóricos de producción de bosones vectoriales W' , con acoples preferentes a fermiones de segunda y tercera generación, que buscan explicar las anomalías en las razones de desintegración $R(D)$ y $R(D^*)$ reportadas por las colaboraciones LHCb, BA-

BAR y Belle.

- Implementar en el código para usar el nuevo algoritmo de identificación del quark charm, incluyendo eficiencias y correcciones asociadas, desarrollado por el experimento CMS.
- Establecer el desempeño del algoritmo de identificación del quark charm con datos del Run 2 del LHC, usando regiones de control con eventos provenientes de $Z(\rightarrow \mu\mu) + b$.

IV. MARCO TEÓRICO

En el ME, las partículas fundamentales que constituyen la materia son conocidas como fermiones, los cuales se clasifican en leptones ($e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$) y quarks (u, d, c, s, b, t). Los leptones, como el electrón (e), el muon (μ) y el tau (τ), tienen la misma carga eléctrica pero difieren en masa. A cada uno de estos leptones le corresponde un neutrino (ν_e, ν_μ, ν_τ), que no posee carga eléctrica. Los quarks, por su parte, portan cargas eléctricas fraccionarias y una carga de color, la cual puede ser roja, verde o azul, una nomenclatura histórica que describe una propiedad cuántica de los quarks y no una cualidad observable directamente.

Las partículas fundamentales en el ME se distribuyen en tres generaciones, ordenadas por su masa; la primera generación tiene la menor masa, mientras que las partículas de tercera generación son las más masivas. La Tabla I resume las propiedades relevantes de cada generación.

Tabla I: Propiedades básicas de quarks y leptones del ME; las siglas rgb hacen referencia a *red, green, blue*, que es son términos usados para cuando se habla de la carga de color [1].

Partícula	Simbolo	Spin	Carga [e^-]	Carga de Color	Masa [MeV/c^2]
Primera Generación					
up	u	1/2	$+\frac{2}{3}$	rgb	$2.3_{0.5}^{0.7}$
down	d	1/2	$-\frac{1}{3}$	rgb	$4.8_{0.3}^{0.5}$
electron	e^-	1/2	-1	0	0.511
neutrino electronico	ν_e	1/2	0	0	$< 10^{-5}$
Segunda Generación					
charm	c	1/2	$+\frac{2}{3}$	rgb	1275 ± 2.5
strange	s	1/2	$-\frac{1}{3}$	rgb	95 ± 5
muon	μ^-	1/2	-1	0	105.7
neutrino muonico	ν_μ	1/2	0	0	$< 10^{-5}$
Tercera Generación					
top	t	1/2	$+\frac{2}{3}$	rgb	173211 ± 510
bottom	b	1/2	$-\frac{1}{3}$	rgb	4660 ± 30
tau	τ^-	1/2	-1	0	1777
neutrino tauonico	ν_τ	1/2	0	0	$< 10^{-5}$

Además de los fermiones, el ME considera a los bosones de calibre (“gauge”) como las partícu-

las fundamentales que median las interacciones entre fermiones. De las cuatro interacciones fundamentales conocidas, tres tienen mediadores gauge identificados, las cuales son partículas con espín igual 1: el fotón (γ) para la interacción electromagnética, los bosones $W^\pm$ y Z^0 para las interacciones débiles de corrientes cargadas y neutras, respectivamente, y el gluón (g) para la interacción fuerte. La gravedad, siendo la cuarta interacción, aún no cuenta con un mediador gauge descubierto y no se encuentra incorporada dentro del ME. Las partículas en el ME adquieren masa mediante la interacción con el campo de Higgs, mediada por el bosón escalar (espín 0) de Higgs. Las características de los bosones gauge se detallan en la Tabla II.

Tabla II: Propiedades básicas de los bosones en el ME [1].

Interacción	Símbolo del Mediador	Spin	Carga [e^-]	Carga de Color	Masa [MeV/c^2]
Fuerte	g	1	0	8 colores	0
	γ	1	0	0	0
Electromagnética	Z^0	1	0	0	$80,385 \pm 0,015$
	$W^\pm$	1	± 1	0	$91,187 \pm 0,002$
Débil					

La agrupación de las partículas fundamentales nos permite explorar los hadrones, que son partículas compuestas de quarks. Los hadrones se clasifican en bariones, compuestos por tres quarks, como el neutrón (udd), y mesones, compuestos por un par quark-antiquark, como el mesón π^+ ($u\bar{d}$).

Grupo de Simetrías del Modelo Estándar

El concepto de simetría, en física, se emplea ampliamente para estudiar la invarianza de las cantidades conservadas en un sistema. Basados en la premisa de que las leyes de la física deben ser invariantes en todos los marcos inerciales, se examinan las simetrías de cantidades conservadas bajo transformaciones de coordenadas, rotaciones, transformaciones temporales y otras.

En la física de partículas, el análisis de las partículas se lleva a cabo mediante representaciones matemáticas en forma de campos, los cuales son únicos para cada partícula y tienen valores definidos en todo punto del espacio y el tiempo. El ME considera cuatro tipos de simetrías que todos los sistemas físicos deben respetar:

- **Local:** Transformaciones que dependen de una región específica del espacio-tiempo.
- **Global:** Transformaciones independientes de cualquier región particular del espacio-tiempo.

- **Espacio-temporal:** Transformaciones de las coordenadas espaciales y temporales que describen los campos.
- **Interna:** Transformaciones propias de los campos.

Estas simetrías pueden representarse mediante el concepto de grupo, que es un conjunto de elementos matemáticos sujetos a ciertas reglas algebraicas [30].

Un ejemplo de grupo de simetría es el grupo unitario, $U(1)$, que representa las simetrías de rotación de un círculo. Otro ejemplo es el grupo unitario de orden dos, $U(2)$, que representa las simetrías en dos dimensiones. Estos grupos de simetrías caracterizan interacciones fundamentales en el ME: la interacción electromagnética se asocia al grupo $U(1)$, la interacción débil al grupo unitario especial $SU(2)$, y la interacción fuerte al grupo $SU(3)$. Estos grupos de simetrías posee una representación matricial y, en el caso de $SU(n)$, son no conmutativos, lo que se denomina como grupo no abeliano.

Con base en esta agrupación de las simetrías del ME, podemos decir que el ME es una teoría no abeliana que describe tres de las cuatro interacciones fundamentales mediante un grupo global de simetrías, representado por el producto de los grupos:

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y.$$

El subíndice C se refiere a la carga de color, el subíndice L representa la quiralidad izquierda en las interacciones débiles observadas asociadas con neutrinos (simetría rota en el ME), y el subíndice Y denota la hipercarga, la cual está relacionada con la carga eléctrica y el número de isospin [1]. En el contexto de la física de partículas, la quiralidad se refiere a la relación entre la dirección del espín de una partícula y su vector de momento lineal.

El Lagrangiano que describe las interacciones y dinámica de las partículas fundamentales conocidas en el ME se presenta en la Ecuación 7.

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. \\ & + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned} \quad (7)$$

En la Ecuación 7, el termino $-\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ representa la dinámica e interacciones entre los bosones

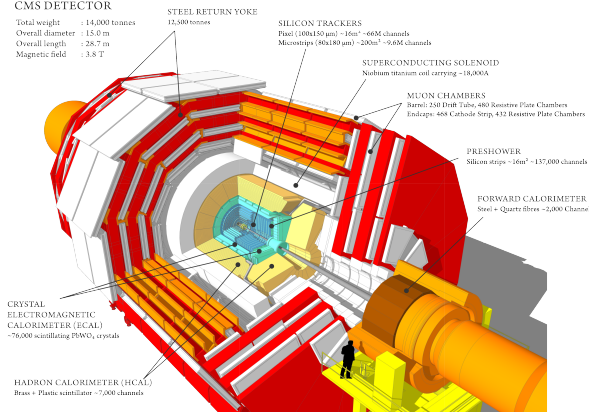


Figura 3: Representación de CMS y sus componentes [32].

vectoriales del ME. El tensor $F_{\mu\nu}$ se conoce como tensor de campos de fuerza. El segundo termino, $i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c.$, explica la dinámica de fermiones, representados por la función ψ . En este termino, la expresión $\not{D}$ se define como la derivada covariante, la cual contiene términos de derivadas espacio-temporales de los campos fermiónicos y términos de calibre, que inicialmente se introducen para preservar la invarianza del Lagrangiano ante transformaciones locales, pero que luego naturalmente explican las interacciones de los fermiones (partículas materia) con los bosones partículas de fuerza.

Es importante notar que “h.c.” denota el conjugado hermitico del termino en cuestión. El tercer termino, $\bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c.$, introduce las interacciones de fermiones con el campo de Higgs y los dos últimos términos, $|D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$, describen la dinámica de los bosones

de Higgs y el campo de Higgs, respectivamente.

Experimento CMS

CMS [31] es, junto con ATLAS, ALICE y LHCb, uno de los cuatro principales experimentos que registran las colisiones de haz del LHC. Su estructura y componentes se muestran en la Figura 3. Como se representa, está compuesto por cinco partes principales: el rastreador de silicio (*tracker*) (TK), el calorímetro electromagnético (ECAL), el calorímetro hadrónico (HCAL), el imán y las cámaras de muones.

Dada su geometría cilíndrica, CMS es dividido en dos regiones: el barril, donde los detectores se ubican en cilindros concéntricos con el haz y *endcaps* donde los detectores se disponen en secciones de discos concéntricos al haz, en regiones con ángulos polares grandes. CMS tiene la capacidad de detectar una amplia gama de canales de interacción, se caracteriza por su efectivo sistema de disparo para muones y su fuerte campo magnético, que le dio nombre al detector.

V. CONSIDERACIONES ÉTICAS

En esta propuesta, se trabajará con la base de datos del experimento CMS. Los datos de las simulaciones y colisiones no están abiertos al público. Los datos extraídos no serán alterados. Todos los algoritmos desarrollados para el análisis de los datos estarán disponibles públicamente en GitHub. Finalmente, no se considera necesario que esta propuesta sea evaluada por el Comité de Ética.

Sebastián Alejandro Reyes Usma
Estudiante

Andrés Flórez
Prof. Andrés Flórez
Director

-
- [1] P. D. G. et al., Review of particle physics, Progress of Theoretical and Experimental Physics **2022**, 083C01 (2022).
 - [2] CERN, Experiments CERN (2023), <https://home.cern/science/experiments>.
 - [3] P. Mohapatra, R. N. Mohapatra, and P. Pal, Implications of E 6 grand unification, Physical Review D **33**, 2010 (1986).
 - [4] J. D. Lykken, *Z-prime bosons and supersymmetry*, Tech. Rep. (Fermi National Accelerator Lab.(FNAL), Batavia, IL (United States), 1996).
 - [5] D. Marzocca, U. Min, and M. Son, Bottom-flavored mono-tau tails at the LHC, Journal of High Energy Physics **2020**, 1 (2020).
 - [6] M. Endo, S. Iguro, T. Kitahara, and M. e. a. Takeuchi, Non-resonant new physics search at the LHC for the $b \rightarrow c \tau \nu$ anomalies, Journal of High Energy Physics **2022**, 1 (2022).
 - [7] J. D. Gómez, N. Quintero, and E. Rojas, Charged current $b \rightarrow c \tau \nu$ anomalies in a general W' boson scenario, Physical Review D **100**, 093003 (2019).

- [8] S. Iguro, M. Takeuchi, and R. Watanabe, Testing leptoquark/EFT in $B \rightarrow D^* l \nu$ at the LHC, The European Physical Journal C **81**, 406 (2021).
- [9] S. Iguro, Y. Omura, and M. Takeuchi, Test of the $R(D^*)$ anomaly at the LHC, Physical Review D **99**, 075013 (2019).
- [10] M. Abdullah, J. Calle, B. Dutta, A. Flórez, and D. Restrepo, Probing a simplified W model of $R(D^*)$ anomalies using b tags, τ leptons, and missing energy, Physical Review D **98**, 055016 (2018).
- [11] W. Altmannshofer, P. B. Dev, and A. Soni, $R(D^*)$ anomaly: A possible hint for natural supersymmetry with R-parity violation, Physical Review D **96**, 095010 (2017).
- [12] V. Barger, W.-Y. Keung, and E. Ma, Sequential W and Z bosons, Physics Letters B **94**, 377 (1980).
- [13] J. Y. Araz, M. Frank, B. Fuks, S. Moretti, and Özdal, Cross-fertilising extra gauge boson searches at the LHC, Journal of High Energy Physics **2021**, 1 (2021).
- [14] A. Flórez, A. Gurrola, W. Johns, Y. Do Oh, P. Sheldon, D. Teague, and T. Weiler, Searching for new heavy neutral gauge bosons using vector boson fusion processes at the LHC, Physics Letters B **767**, 126 (2017).
- [15] A. Grozin, Effective field theories, Particles **3**, 245 (2020).
- [16] J. Lees, V. Poireau, V. Tisserand, E. Grauges, A. Palano, G. Eigen, B. Stugu, D. Brown, L. Kerth, Y. G. Kolomensky, *et al.*, Measurement of an excess of $B \rightarrow D^* \tau^- \nu$ decays and implications for charged Higgs bosons, Physical Review D **88**, 072012 (2013).
- [17] J. Lees, V. Poireau, V. Tisserand, J. G. Tico, E. Grauges, M. Martinelli, D. Milanes, A. Palano, M. Pappagallo, G. Eigen, *et al.*, Evidence for an excess of $B \rightarrow D^* \tau^- \nu$ decays, Physical Review Letters **109**, 101802 (2012).
- [18] G. Caria, P. Urquijo, I. Adachi, *et al.*, Measurement of $R(D)$ and $R(D^*)$ with a Semileptonic Tagging Method, Physical review letters **124**, 161803 (2020).
- [19] S. Hirose, T. Iijima, I. Adachi, K. Adamczyk, H. Aihara, S. Al Said, D. Asner, H. Atmacan, T. Aushev, R. Ayad, *et al.*, Measurement of the τ lepton polarization and $R(D^*)$ in the decay $B \rightarrow D^* \tau^-$ with one-prong hadronic τ decays at Belle, Physical Review D **97**, 012004 (2018).
- [20] Y. Sato, T. Iijima, K. Adamczyk, H. Aihara, D. Asner, H. Atmacan, T. Aushev, R. Ayad, T. Aziz, V. Babu, *et al.*, Measurement of the branching ratio of $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}$ relative to $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \ell^- \bar{\nu}_\ell$ decays with a semileptonic tagging method, Physical Review D **94**, 072007 (2016).
- [21] S. Hirose, T. Iijima, I. Adachi, K. Adamczyk, H. Aihara, S. Al Said, D. Asner, H. Atmacan, V. Aulchenko, T. Aushev, *et al.*, Measurement of the τ lepton polarization and $R(D^*)$ in the decay $B \rightarrow D^* \tau^- \nu$, Physical review letters **118**, 211801 (2017).
- [22] M. Huschle, T. Kuhr, M. Heck, *et al.*, Measurement of the branching ratio of $B \rightarrow D^{(*)} \tau^- \nu$ relative to $B \rightarrow D^{(*)} \ell^- \nu \rightarrow \ell$ decays with hadronic tagging at Belle, Physical Review D **92**, 072014 (2015).
- [23] L. Collaboration, Measurement of the Ratio of the $B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_\tau$ and $B^0 \rightarrow D^{*-} \mu^+ \nu_\mu$ Branching Fractions Using Three-Prong τ -Lepton Decays, Phys Rev Lett **120**, 171802 (2018).
- [24] D. Bigi and P. Gambino, Revisiting $B \rightarrow D \ell \nu$, Phys. Rev. D **94**, 094008 (2016).
- [25] S. Jaiswal, S. Nandi, and S. K. Patra, Extraction of V_{cb} from $B \rightarrow D^* \ell \nu \ell$ and the Standard Model predictions of $R(D^*)$, Journal of High Energy Physics **2017**, 1 (2017).
- [26] S. Fajfer, J. F. Kamenik, and I. Nišandžić, $B \rightarrow D^* \tau \bar{\nu}_\tau$ sensitivity to new physics, Phys. Rev. D **85**, 094025 (2012).
- [27] Y. S. Amhis *et al.* (HFLAV), Averages of b-hadron, c-hadron, and τ -lepton properties as of 2021, Phys. Rev. D **107**, 052008 (2023), arXiv:2206.07501 [hep-ex].
- [28] S. Moortgat, *Development of new charm-tagging methods for the search for Flavour Changing top-quark dark matter interactions at the LHC*, Ph.D. thesis, Vrije U., Brussels (2015).
- [29] A. Tumasyan, W. Adam, J. W. Andrejkovic, T. Bergauer, S. Chatterjee, M. Dragicevic, A. Escalante Del Valle, R. Fruehwirth, M. Jeitler, N. Krammer, *et al.*, A new calibration method for charm jet identification validated with proton-proton collision events at $\sqrt{s}=13$ TeV, Journal of Instrumentation **17** (CMS-BTV-20-001; CERN-EP-2021-177; FERMILAB-PUB-22-220-CMS; arXiv: 2111.03027).
- [30] D. S. Dummit and R. M. Foote, *Abstract algebra*, Vol. 3 (Wiley Hoboken, 2004).
- [31] C. Collaboration, S. Chatrchyan, G. Hmayakyan, V. Khachatryan, A. Sirunyan, W. Adam, T. Bauer, T. Bergauer, H. Bergauer, M. Dragicevic, *et al.*, The CMS experiment at the CERN LHC, Jinst **3**, S08004 (2008).
- [32] C. Collaboration, CMS Detector Design (2023), <https://cms.cern/news/cms-detector-design>.