

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

INSTITUTO DE FÍSICA

PROYECTO DE MAESTRÍA

Estudios de *High Level Trigger* para la detección de materia oscura.

Para modelos con fermiones vectoriales de
espectro comprimido usando el detector CMS
en el LHC

Autor:
Diego Barón

Asesor:
Nelson Vanegas

22 de marzo de 2018



FACULTAD DE
CIENCIAS EXACTAS
Y NATURALES

Índice

1. Generalidades del proyecto	2
2. Marco conceptual	3
2.1. CMS en el LHC	3
2.2. Sistema de <i>Trigger</i>	9
2.3. Materia oscura en colisionadores.	10
3. Problema y pregunta de investigación	13
4. Objetivos y cronograma	14
4.1. Objetivo general	14
4.2. Objetivos específicos	14
4.3. Cronograma.	14
5. Infraestructura y recursos	15

1. Generalidades del proyecto

Título del proyecto:

Estudios de *High Level Trigger* para la detección de materia oscura. Para modelos con fermiones vectoriales de espectro comprimido usando el detector CMS en el LHC.

Línea de investigación:

Física de partículas experimental.

Duración:

Tres semestres.

Lugar de ejecución:

Universidad de Antioquia.

Equipo de investigación:

Diego Barón: Estudiante de maestría. *Nelson Vanegas*: Asesor, director proyecto UdeA-CMS. *Jose David Ruíz*: Coasesor, investigador postdoctoral en la Universidad de Vanderbilt en colaboración con CMS.

Resumen ejecutivo:

En este trabajo se presenta la propuesta de investigación del estudiante de maestría Diego Alberto Barón Moreno. Desde 1930, gracias a las observaciones de las curvas de rotación de las estrellas en las galaxias, se plantea la existencia de la materia oscura. En un acelerador de partículas como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) se colisionan haces de protones e iones de plomo y en estas colisiones, en principio, se pueden generar las partículas hipotéticas que constituyen la materia oscura en el universo. Sin embargo, debido a la gran cantidad de datos que toman los detectores del LHC, como el Solenoide Compacto de Muones (CMS)[1], se deben aplicar filtros para aislar los eventos interesantes. En este trabajo proponemos desarrollar un filtro de eventos de alto nivel (en inglés *High Level Trigger path*), es decir: una serie de algoritmos de selección de eventos, que se ejecutan luego de la obtención de datos en el detector CMS. El objetivo es que este *High Level Trigger path (HLT path)* sea adecuado para la búsqueda de materia oscura (DM) en ciertos modelos específicos, en el detector CMS en el LHC.

2. Marco conceptual

El problema de la materia oscura (DM) es uno de los varios problemas de la física de partículas, que aún no ha sido satisfactoriamente resuelto. Desde 1930 gracias a las observaciones independientes de Lundmark y Zwicky [2, 3] se sabe que el contenido de materia de las galaxias debe ser mayor al que aporta la materia bariónica. En sus experimentos ellos encontraron que las velocidades orbitales del gas y de las estrellas mantienen una tendencia constante respecto a la distancia al centro de la galaxia. Esto está en contraposición con lo que se espera de aplicar las leyes de Newton de la gravitación: que la velocidad decrezca como una función de la distancia. Esto se puede ver en la figura 1.

A continuación vamos a describir los componentes fundamentales del detector CMS en el LHC, poniendo especial atención en el sistema *High Level Trigger*.

2.1. CMS en el LHC

El Gran Colisionador de Hadrones es el acelerador de partículas más grande y energético operado actualmente por la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN). El LHC usa el mismo tunel de 27 km, cavado en promedio a 100 m de profundidad, del antiguo Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP). EL LHC es capaz de colisionar protones con una energía por haz de 7 TeV, sin embargo a día de hoy se hace a 6.5 TeV.

En el LHC están ubicados 4 experimentos principales: LHCb [5], ALICE [6], ATLAS [7] y CMS. Estos últimos dos son detectores de proposito general, es decir, fueron diseñados para detectar señales de nueva física en estados finales de partículas como electrones, fotones, muones y hadrones. El LHC está dividido en dos partes: la cadena de aceleración y el anillo principal. En la cadena de aceleración los protones son extraídos y pasados por una serie de aceleradores que los llevan hasta una energía de 450 GeV, momento en que son inyectados en el anillo principal. El anillo principal está compuesto de dos anillos que llevan los protones en direcciones opuestas, los anillos están contruidos por 2090 imanes dipolares y superconductores de 15 m de largo, enfriados a 1.9 K y con un vacío de 10^{-9} mbar; cada uno capaz de producir un campo magnético de 8,33 T. Además de estos imanes dipolares, el LHC

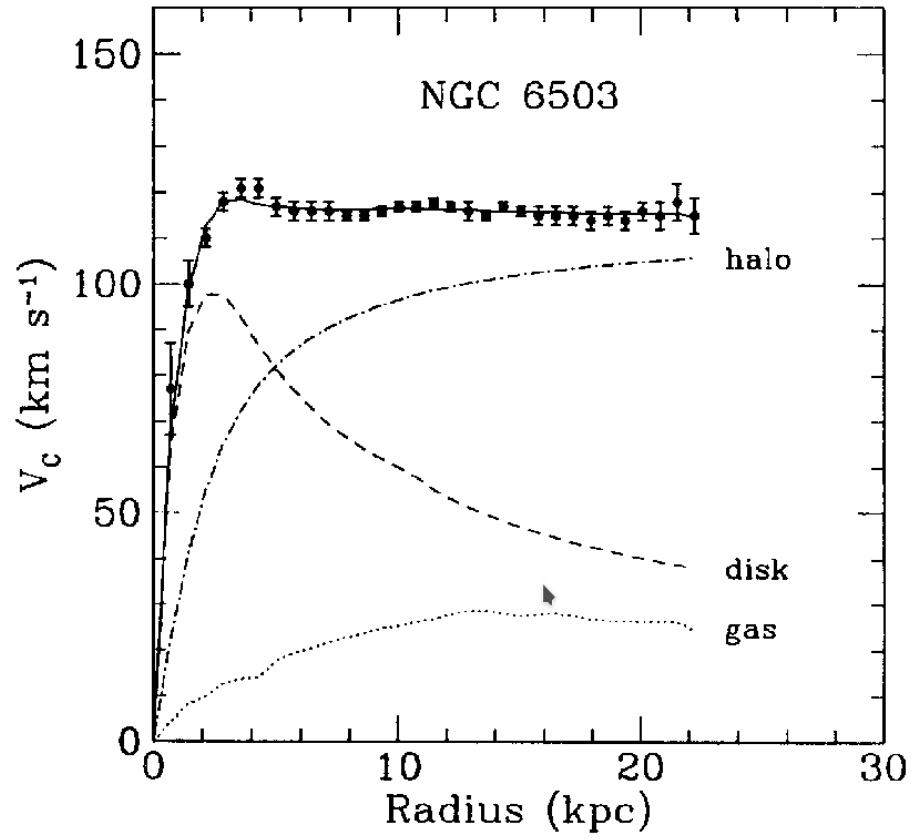


Figura 1: Curva de rotación galáctica para NGC 6503, vemos el perfil de masa del disco y del gas. Además se ve el perfil de materia oscura necesario para ajustar las observaciones. Tomado de [4].

también cuenta con 520 cuadrupolos, 2464 sextupolos y 1232 octupolos usados para colimar el haz [8].

El Solenoide Compacto de Muones (CMS) es en tamaño, el segundo experimento más grande del LHC después de ATLAS. CMS debe su nombre “solenoide compacto” a que varios de los sistemas de detección se encuentran dentro de su gran solenoide superconductor, capaz de producir un campo magnético uniforme en su interior de 4 T. Y “solenoide de muones” debido a que posee un sistema de detección de muones muy preciso y eficiente. CMS es un detector con forma cilíndrica, mide aproximadamente 30 m de largo por 15 m de diámetro y pesa 14000 Ton (esto lo convierte en el experimento más pesado del LHC). La colaboración se compone de aproximadamente 3500 personas de 182 institutos de física en 41 países. Una representación tres dimensional del detector se puede ver en la figura 2.

En este punto es importante describir el sistema de coordenadas que se utiliza en CMS [8]. El origen de coordenadas está en el centro del detector, en el denominado “punto de interacción”. El eje Z está definido en dirección del haz, apuntando hacia las montañas Jura. El eje Y está definido en dirección del cenit y el eje X positivo apuntando hacia el centro del anillo del LHC. Se define el ángulo ϕ en el plano x-y, desde x hacia y; el ángulo θ se define en el plano z-y, desde z hacia y. Esto se puede ver en la figura 3.

En física de partículas experimental es usual trabajar con cantidades invariantes relativistas, es por esto que se define:

$$\eta = -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right). \quad (1)$$

Si \vec{p} es el momento y E la energía de una partícula se define: p_L (momento longitudinal), como la proyección del momento en dirección de Z. Además, se define la distancia radial en el plano x-y, el plano transversal al haz, donde se llama a la proyección del momento lineal de la partícula en esta dirección momento transversal (p_T).

El solenoide superconductor del experimento CMS tiene 13 m de largo y 6 m de diametro. Es capaz de generar un campo magnético uniforme de 4 T en su interior y está construido por 4 capas de espiras de Niobio-Titanio (NbTi), enfriado a una temperatura de 4.45K, esto para que se alcance el

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
 Overall diameter : 15.0 m
 Overall length : 28.7 m
 Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
 12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
 Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}$) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
 Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}$) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
 Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS
 Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
 Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
 Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER
 Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
 ELECTROMAGNETIC
 CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
 Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels

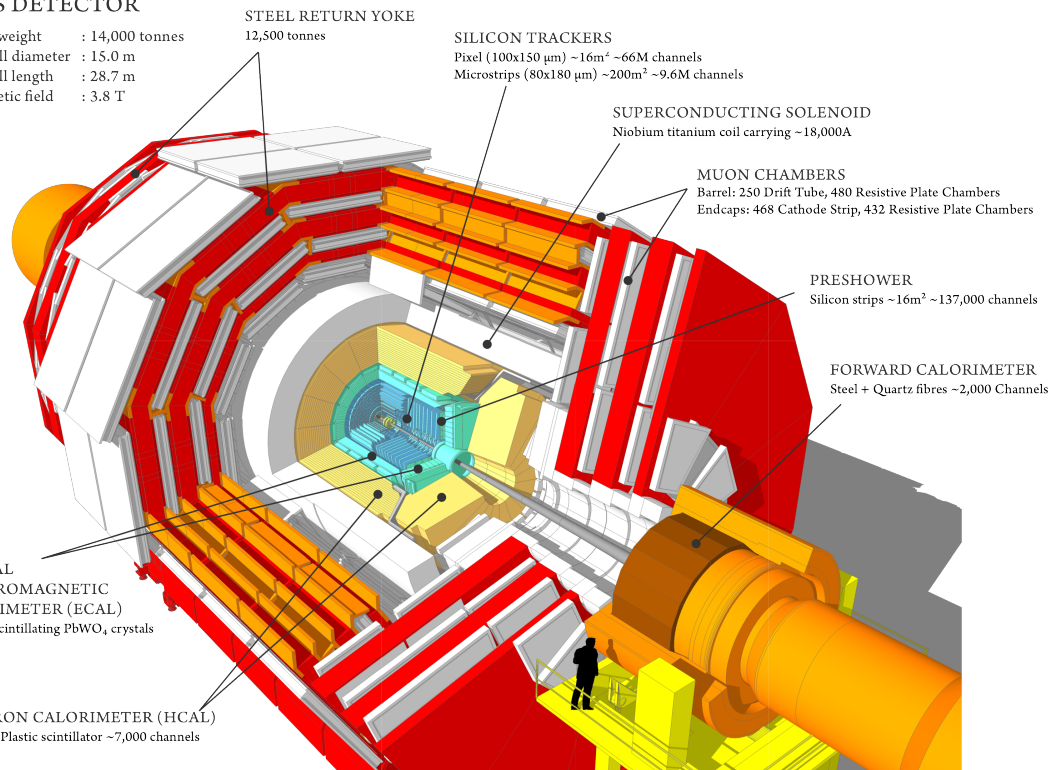


Figura 2: Diseño interno del detector CMS [1].

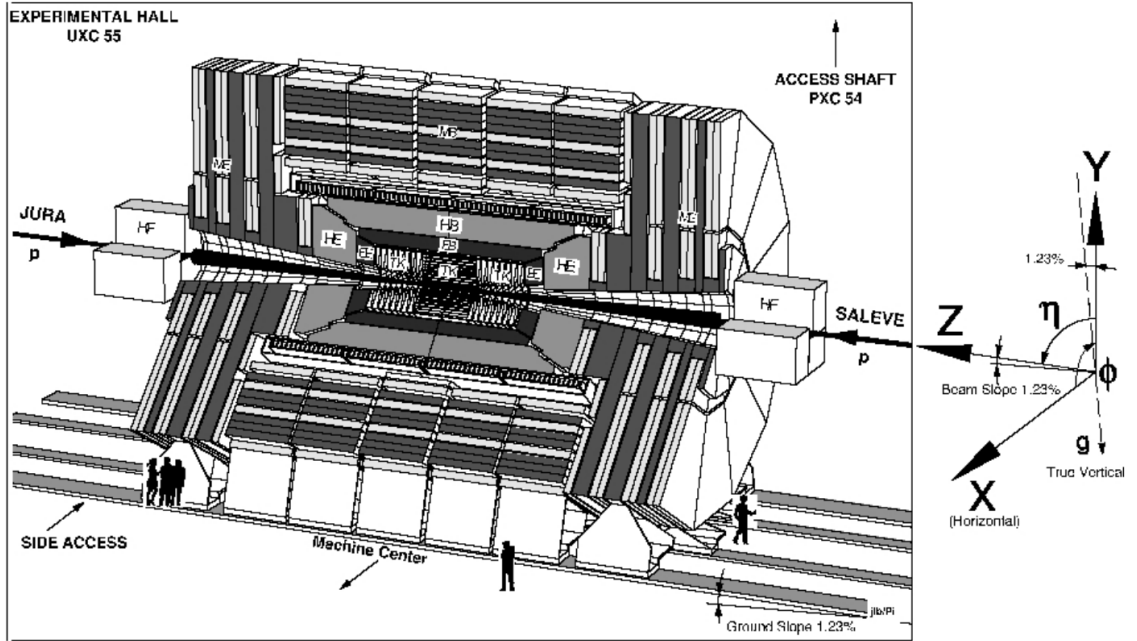


Figura 3: Sistema de coordenadas utilizado en CMS [8].

estado superconductor del material. Este solenoide superconductor está rodeado por 5 barriles y 3 discos de hierro, que tienen el objetivo de devolver el campo magnético generando un campo exterior de 2 T. Esta configuración de campos magnéticos es responsable de curvar las trayectorias de las partículas cargadas.

Dentro del solenoide se encuentra el sistema de reconstrucción de trazas (*Tracker System*), un sistema de detección diseñado con dos tecnologías: pixeles y tiras de silicio. El *tracker system* está diseñado para identificar los vértices de las colisiones con una precisión de $9 \mu\text{m}$ y una eficiencia del 98 %, esta eficiencia se degrada con el tiempo debido a los daños por radiación que sufren los materiales. Cuando una partícula cargada pasa por este sistema, se crean pares electrón-hueco en el material y esto genera una señal eléctrica que luego es amplificada. Este sistema fue construido para ser bastante resistente a la radiación y se espera que dure 10 años.

Luego de este sistema se encuentra el calorímetro electromagnético (ECAL).

Este fue construido para detener electrones y fotones y medir su energía; el sistema está compuesto por cristales de tungstato de plomo, el cual fue escogido por su corta profundidad de radiación, alta densidad y rápido centelleo (25 ns). La única desventaja de este material es su alta sensibilidad de respuesta a la temperatura (2%/C). Los cristales van perdiendo transparencia con la luminosidad integrada (que es la razón entre la cantidad de eventos o colisiones que se han dado en el LHC y la sección eficaz de colisión para los protones[8]). Por tanto, la transparencia de los cristales tiene que ser corregida constantemente por un sistema de láser. El ECAL cuenta con 61200 cristales en el barril y 7324 en las tapas del calorímetro.

Cuando se colisionan dos partículas constituidas por quarks (hadrones), como los protones en el caso del LHC, se pueden generar quarks en los estados finales de la colisión. Sin embargo, debido al confinamiento del color estos quarks empiezan a agruparse y a formar de nuevo hadrones, este proceso se conoce como hadronización. Esto puede suceder iterativamente generando “lluvias de hadrones” o también llamados jets.

Para detener y detectar los jets hadrónicos se diseñó el calorímetro hadrónico (HCAL), cierta parte de este sistema se encuentra dentro del solenoide (*Hadron Endcap Calorimeter* y *Hadron Barrel Calorimeter*) y fuera están el *Outer Calorimeter* y el *Hadron Forward Calorimeter* (estos permiten extender el rango angular de detección). Los calorímetros tienen el objetivo de detectar los hadrones y lo hacen de la siguiente manera: el sistema tiene intercalados placas de acero con cristales centelladores, las placas de acero generan las cascadas de hadrones y cuando estos pasan por los centelladores, la luz generada es convertida en corrientes eléctricas por fotodiodos híbridos (HPDs). Estas corrientes permiten medir la energía de los hadrones. Es importante mencionar que debido a la posición del *Forward Calorimeter*, este recibe más radiación comparado con los otros calorímetros hadrónicos. Esto es debido a que el *Forward Calorimeter* está en la dirección del haz incidente, por tanto, los centelladores fueron construidos de un material más resistente a la radiación como lo es el cuarzo.

Finalmente, en la parte más externa del detector están ubicados los detectores de muones, esto se debe a que estas partículas tienen un gran poder de penetración. Las cámaras de detección de muones están hechas de 3 tecnologías diferentes: *Drift Tube Chambers (DT)*, *Cathode Strip Chambers(CSC)*

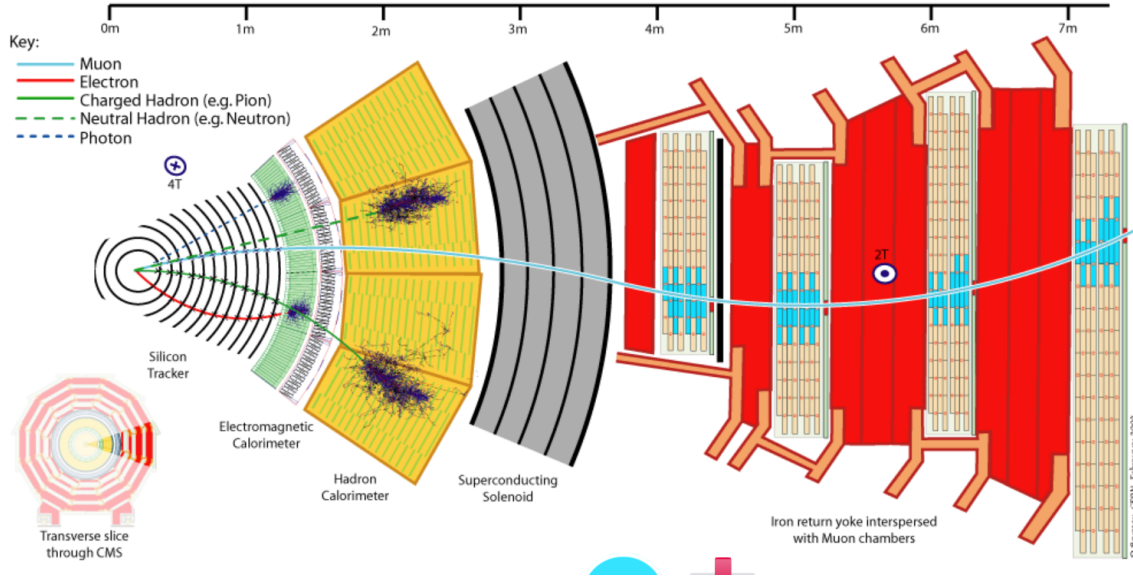


Figura 4: Corte transversal del detector CMS [1].

y *Resistive Plate Chambers (RPC)* . Las tres están basadas en la detección por ionización de gases: al paso de partículas cargadas se generan corrientes de deriva. Estas corrientes son medidas e interpretadas en términos de la energía y posición de los muones. En la figura 3 se muestra una recreación a un corte transversal del detector.

2.2. Sistema de *Trigger*

CMS fue diseñado para tomar los datos de cada colisión que ocurre. Cada 25 ns ocurren aproximadamente 20 colisiones inelásticas [9] y cada uno de estos eventos contiene una información de 5MB aproximadamente. Esto produce un flujo de datos de 1 PB/s (PB=Petabyte), esta cantidad de información no puede ser almacenada. Por tanto, debe hacerse una selección de eventos en tiempo real, el sistema encargado de hacer esto recibe el nombre de *Trigger System* y lleva a cabo esta tarea en dos fases [10].

La primera de fase es el *Level 1 Trigger (L1)*, este es un proceso basado en Hardware construido específicamente para analizar los datos provenientes de los sistemas de detección y escoger los eventos más interesantes. Por

ejemplo, aquellos que contienen partículas con gran momento transverso o combinaciones raras de partículas en los estados finales. Este filtro reduce el flujo de datos en dos ordenes de magnitud y dispone de $3.2 \mu\text{s}$ para decidir, esto hace que la memoria de almacenamiento tenga que ser suficiente para guardar los datos de 128 colisiones.

La segunda fase de la selección se conoce como *High Level Trigger (HLT)*. Es un proceso basado en software: una serie de algoritmos corren en granjas de varios miles de procesadores, estos códigos han sido previamente implementados con el objetivo de realizar búsquedas predeterminadas y analizan los datos que pasan el L1. El tiempo de decisión de este sistema es aproximadamente 100 ms y al finalizar la selección, el flujo original de datos ha sido reducido por un factor de cinco ordenes de magnitud.

2.3. Materia oscura en colisionadores.

El modelo estándar de la cosmología predice que sólo conocemos como se comporta el 5 % del contenido de materia del universo (materia bariónica), el restante 95 % se cree es: materia oscura (26 %) y energía oscura (69 %) [11]. Las evidencias indirectas de la existencia de materia oscura son variadas y contundentes: lentes gravitacionales, el cúmulo bala, la radiación cósmica de fondo y la estabilidad del gas caliente en clusters de galaxias son algunas de ellas [4].

Hace 20 años algunas propuestas a candidatos de materia oscura incluían los MACHOS (*MAssive Compact Halo ObjectS*), que consisten de objetos astrofísicos muy tenues para ser detectados, por ejemplo: agujeros negros, estrellas de neutrones, enanas blancas, etc. Sin embargo, experimentos recientes descartan esta posibilidad y por tanto nos dejan solo con los candidatos no bariónicos como posibles explicaciones [12, 13].

Los candidatos más populares actualmente son los WIMPS (*Weakly Interacting Massive ParticleS*) y los Axiones. Ambas son partículas que surgen como propuesta de solución a otros problemas en física de partículas: Supersimetría (SUSY) [14] y simetría Carga-Paridad en interacciones fuertes (*Strong CP*) [15], respectivamente, y por esto son tan populares. Se sabe que la materia oscura no puede ser caliente, es decir, tener velocidades relativistas, debido a que esto implicaría que el universo debería ser más homogéneo de lo que

es. Y tampoco puede interactuar eléctricamente, ya que interaccionaría con el gas interestelar.

El HLT path que queremos proponer responde a una necesidad específica: búsqueda de señales de nueva física en modelos del tipo *Singlet-Doublet Fermion Dark Matter* (SDFDM)[16]. Uno de los posibles procesos en este tipo de modelos se puede ver en la figura 5. Este proceso tiene en los estados finales: jets , un par de muones y partículas de materia oscura que escaparían del detector y por tanto se verían como energía transversa faltante (MET). Adicionalmente, si la masas de los fermiones f y χ tienen valores cercanos, los muones tendrán poco momento lineal y por tanto bajo p_T . Este tipo de señal es conocida como Fermiones Vectoriales (VLF) de espectro comprimido (CS). En este caso debido al bajo p_T de los muones se espera que uno de ellos no sea reconstruido debido a la eficiencia del detector para detectar muones de bajo momento transversal [17]. Así el HLT path debe ser diseñado para detectar: un solo muón con bajo p_T y además que la MET asociada a los objetos reconstruidos en el evento sea pequeña. En específico, una variable que sería interesante restringir basados en esta condición (MET bajo), es la energía transversa hadrónica faltante (MHT). El MHT es la MET asociada a los objetos reconstruidos como hadrones (jets).

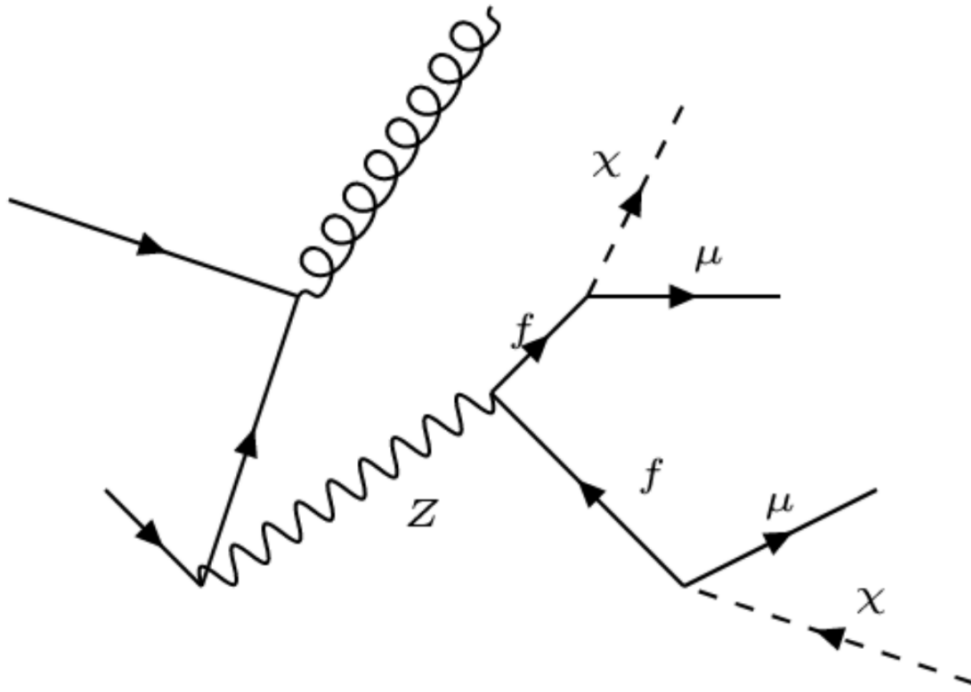


Figura 5: Proceso posible en modelos SDFDM, con un par de muones y jets en los estados finales.

3. Problema y pregunta de investigación

Conforme a lo establecido en las secciones anteriores, podemos ver que el problema de encontrar la materia oscura puede resolverse, al menos parcialmente, mediante la búsqueda de la misma en colisionadores. Inclusive, si no se encuentra ninguna señal en los experimentos, estos sirven para establecer límites en las masas, constantes de acople y demás parámetros en los modelos. Ya hemos visto que modelos como [16] motivan búsquedas en aceleradores como LHC. Sin embargo, debido a la cantidad de datos que toman detectores como CMS se deben idear filtros que nos dejen con la información que consideramos relevante a la hora de realizar las búsquedas. Por tanto, nuestra idea es responder: **Dado que modelos como SDFDM, motivan la búsqueda de DM en CMS. ¿Se puede proponer un *High Level Trigger path* para el experimento CMS del CERN con las siguientes características: un solo muón de bajo p_T y eventos con baja MET y MHT?**

4. Objetivos y cronograma

4.1. Objetivo general

Desarrollar y validar un *Hight Level Trigger path (HLT)* para el experimento CMS del CERN pertinente para su uso en el estudio de señales de materia oscura con: un solo muón de bajo p_T y eventos con poca MET y MHT en el detector.

4.2. Objetivos específicos

- Estudio del modelo que desea ponerse a prueba, estudiando la señal que quiere detectarse y sus *backgrounds*.
- Construcción de un HLT path usando la herramienta de CMS.
- Estudiar la eficiencia y otras características de dicho HLT path y proponerlo.
- Aplicar el HLT al menos a un modelo específico, un ejemplo podría ser el modelo [16].

4.3. Cronograma.

Trimestre	2018-1	2018-2	2018-3	2018-4	2019-1	2019-2
Revisión de bibliografía.	*	*	*	*	*	
Estudio herramienta HLT de CMS.	*	*				
Estudio modelo SDFDM.	*	*				
Construcción del HLT	*	*	*			
Estudio de eficiencia.		*	*			
Aplicar el HLT a un modelo específico.				*	*	
Redacción tesis.					*	*

5. Infraestructura y recursos

Recursos computacionales.

Para utilizar las herramientas de simulación de eventos como MADGRAPH [18], PYTHIA [19] y DELPHES [20] se necesita acceso a un cluster computacional de mediana capacidad: 50 núcleos y 1 TB de almacenamiento. Para el procesamiento de datos provenientes de CMS se necesita acceso a la red computacional del CERN (grid) y esto sólo es posible si se es miembro. En este caso, la Universidad de Antioquia inició en 2016 una colaboración con el experimento CMS y tanto el estudiante, como el asesor y coasesor son miembros del experimento con acceso a los recursos computacionales.

Referencias

- [1] G. L. Bayatian *et al.*, “CMS Physics,” 2006.
- [2] F. Zwicky, “Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln,” *Helvetica Physica Acta*, Vol. 6, p. 110-127, 1933.
- [3] K. Lundmark, “Über die bestimmung der entfernungen, dimensionen, massen und dichtigkeit für die nächstgelegenen anagalacktischen sternsysteme,” *Lund Medd.* 125, 1, 1930.
- [4] K. Freese, “Status of Dark Matter in the Universe,” *Int. J. Mod. Phys.*, vol. 1, no. 06, pp. 325–355, 2017.
- [5] A. A. Alves, Jr. *et al.*, “The LHCb Detector at the LHC,” *JINST*, vol. 3, p. S08005, 2008.
- [6] K. Aamodt *et al.*, “The ALICE experiment at the CERN LHC,” *JINST*, vol. 3, p. S08002, 2008.
- [7] G. Aad *et al.*, “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider,” *JINST*, vol. 3, p. S08003, 2008.
- [8] J. D. Ruiz Alvarez, *Search for a vector-like quark T' decaying into $top+Higgs$ in single production mode in full hadronic final state using CMS data collected at 8 TeV*. PhD thesis, Los Andes U., 2016-05-26.
- [9] O. S. Bruning, P. Collier, P. Lebrun, S. Myers, R. Ostojic, J. Poole, and P. Proudlock, “LHC Design Report Vol.1: The LHC Main Ring,” 2004.
- [10] V. Khachatryan *et al.*, “The CMS trigger system,” *JINST*, vol. 12, no. 01, p. P01020, 2017.
- [11] P. A. R. Ade *et al.*, “Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters,” *Astron. Astrophys.*, vol. 594, p. A13, 2016.
- [12] K. Freese, B. Fields, and D. Graff, “Limits on stellar objects as the dark matter of our halo: nonbaryonic dark matter seems to be required,” *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, vol. 80, p. 0305, 2000.

- [13] B. D. Fields, K. Freese, and D. S. Graff, “Chemical abundance constraints on white dwarfs as halo dark matter,” *Astrophys. J.*, vol. 534, pp. 265–276, 2000.
- [14] G. Jungman, M. Kamionkowski, and K. Griest, “Supersymmetric dark matter,” *Phys. Rept.*, vol. 267, pp. 195–373, 1996.
- [15] R. D. Peccei, “The Strong CP problem and axions,” *Lect. Notes Phys.*, vol. 741, pp. 3–17, 2008. [,3(2006)].
- [16] S. Horiuchi, O. Macias, D. Restrepo, A. Rivera, O. Zapata, and H. Silverwood, “The fermi-lat gamma-ray excess at the galactic center in the singlet-doublet fermion dark matter model,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2016, no. 03, p. 048, 2016.
- [17] S. Chatrchyan *et al.*, “Performance of CMS muon reconstruction in pp collision events at $\sqrt{s} = 7$ TeV,” *JINST*, vol. 7, p. P10002, 2012.
- [18] J. Alwall, R. Frederix, S. Frixione, V. Hirschi, F. Maltoni, O. Mattelaer, H. S. Shao, T. Stelzer, P. Torrielli, and M. Zaro, “The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations,” *JHEP*, vol. 07, p. 079, 2014.
- [19] T. Sjöstrand, S. Ask, J. R. Christiansen, R. Corke, N. Desai, P. Ilten, S. Mrenna, S. Prestel, C. O. Rasmussen, and P. Z. Skands, “An Introduction to PYTHIA 8.2,” *Comput. Phys. Commun.*, vol. 191, pp. 159–177, 2015.
- [20] J. de Favereau, C. Delaere, P. Demin, A. Giammanco, V. Lemaître, A. Mertens, and M. Selvaggi, “DELPHES 3, A modular framework for fast simulation of a generic collider experiment,” *JHEP*, vol. 02, p. 057, 2014.