

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

INSTITUTO DE FÍSICA

PROYECTO DE MAESTRÍA

---

High Level Trigger studies for  
the detection of dark matter in  
models with vector like  
fermions using the CMS  
detector in the LHC

---

*Autor:*

Diego Barón

*Asesor:*

Nelson Vanegas

25 de noviembre de 2017



FACULTAD DE  
CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES



# 1. Generalidades del proyecto.

## Título del proyecto:

High Level Trigger studies for the detection of dark matter in models with vector like fermions using the CMS detector in the LHC

## Línea de investigación:

Física de partículas experimental.

## Duración:

Dos años.

## 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 en CMS.

## Resumen ejecutivo:

En este trabajo se presenta la propuesta de trabajo del estudiante de maestría Diego Barón. 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 experimentos como el LHC se colisionan haces de partículas y en estas colisiones en principio se pueden generar las partículas que constituyen la materia oscura en el universo, sin embargo debido a la gran cantidad de datos que toman los detectores como CMS deben aplicarse filtros para aislar los eventos interesantes, en este trabajo pretendemos desarrollar un filtro (path High Level Trigger) adecuado para la búsqueda de materia oscura en el detector CMS en LHC.

## 2. Marco conceptual.

El problema de la materia oscura (DM) es quizás el problema más viejo de la física de partículas, que aún no ha sido satisfactoriamente resuelto, desde 1930 gracias a las observaciones independientes de Lundmark y Zwicky se sabe que el contenido de materia de las galaxias debe ser mayor al que aporta la materia bariónica, en sus experimentos esto se expresaba como el hecho de que las velocidades orbitales del gas y de las estrellas mantienen una tendencia constante respecto a la distancia al centro de la galaxia, en contraposición con lo esperado: que la velocidad decrezca como una función de la distancia. Esto se puede ver en la figura 1.

Vamos a describir como se puede utilizar un detector como el CMS en el LHC para hacer búsquedas de posibles candidatos a DM, poniendo especial atención en el High Level Trigger (HLT).

### 2.1. CMS en el LHC.

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) 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 túnel 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 e iones de Plomo 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: LHC-b, ALICE, ATLAS y CMS. Estos últimos dos son detectores de propósito general, es decir, fueron diseñados para detectar señales de nueva física en estados finales de partículas como electrones, fotones, muones y jets de 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. Este está compuesto de dos anillos que llevan los protones en direcciones opuestas, los anillos están constituidos por 2090 imanes de 15 m, enfriados a 1.9 K y con un vacío de  $10^{-11}$  mbar, cada uno capaz de producir un campo magnético de 8,33 T. Además de estos imanes dipolares, el LHC también cuenta con 520 cuadrupolos, 2464 sextupolos y

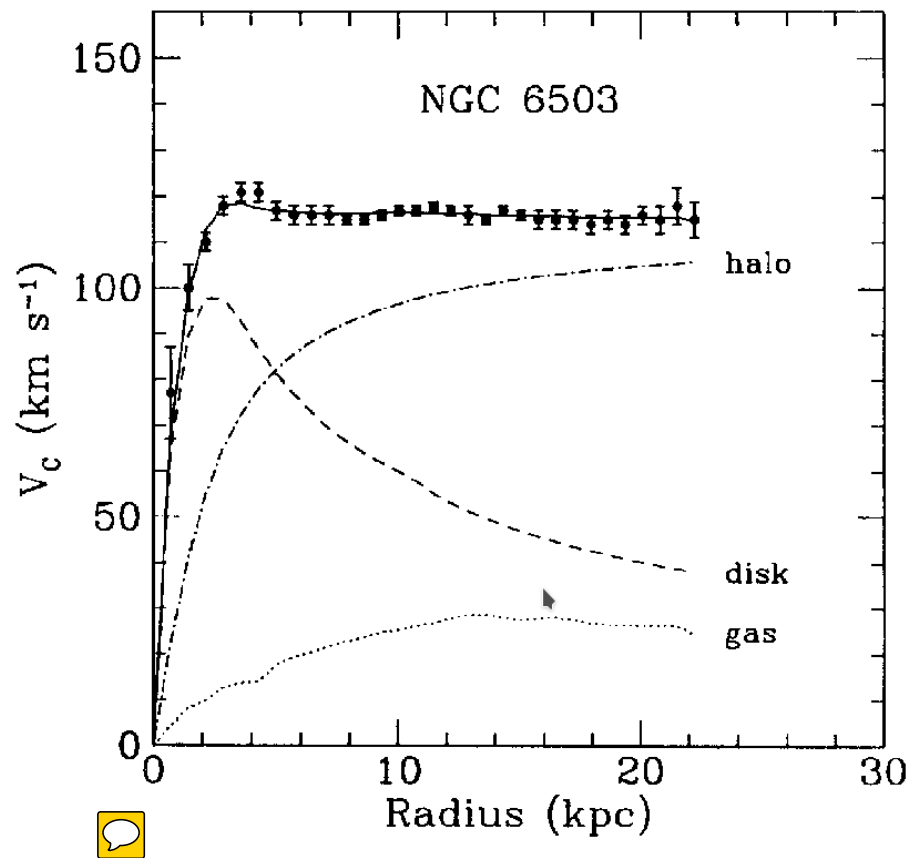


Figura 1: Curva de rotacion galáctica para NGC 6503, vemos el perfil de masa del disco y del gas y el perfil de materia oscura necesario para ajustar los datos.

1232 octupolos usados para colimar el haz. [1]

El Solenoide Compacto de Muones (CMS) es, en tamaño, el segundo experimento más grande del LHC después de ATLAS, debe su nombre (solenoide compacto) a que varios de los sistemas de detección se encuentran dentro del su gran imán superconductor, capaz de producir un campo magnético uniforme en su interior de 3.8 T y (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, pesa 14000 Ton (esto lo convierte en el experimento más pesado del LHC) y 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.



El imán del CMS tiene 13 m de largo y 6 m de diámetro, es capaz de generar un campo magnético uniforme de 4 T en su interior y está construido por 4 capas de espiras de NbTi a 4.45K para que se alcance el estado superconductor, este imán 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 Tracker System, un sistema de detección diseñado con dos tecnologías: Píxeles y tiras de silicio, está diseñado para identificar los vértices de las colisiones con una precisión de  $9 \mu\text{m}$  y una eficiencia del 98 % (que se degrada con la luminosidad integrada), cuando una partícula cargada pasa 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

## 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  $\text{PbWO}_4$  crystals

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

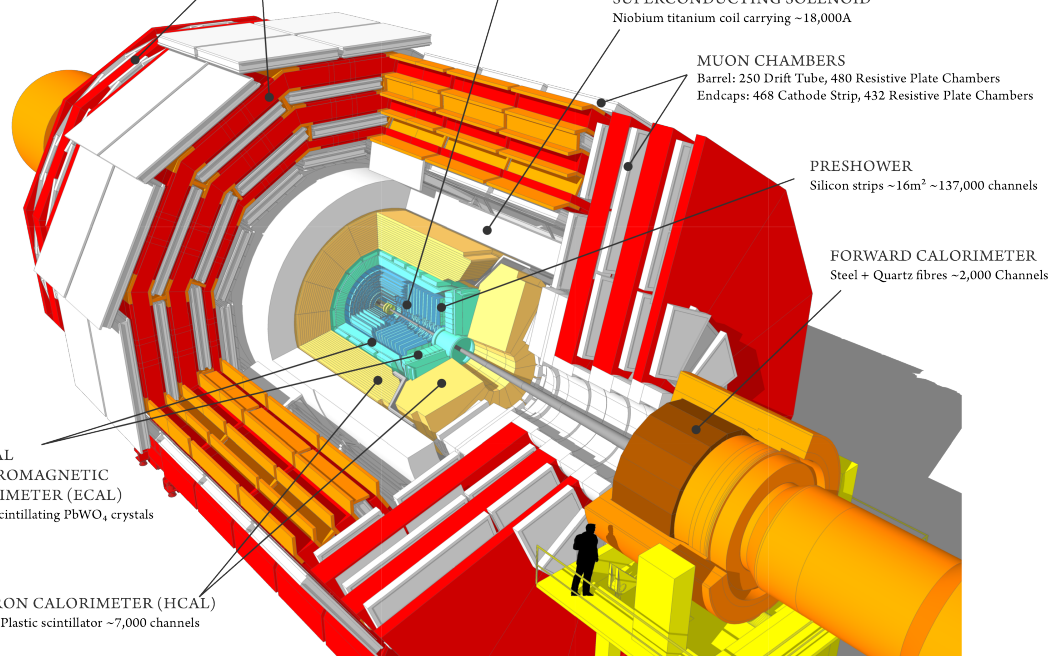


Figura 2: Diseño interno del detector CMS.

(25 ns), la única desventaja del mismo es su alta sensibilidad de respuesta a la temperatura (2%/C). Los cristales van perdiendo transparencia con la luminosidad integrada y por tanto esta tiene que ser corregida constantemente por un sistema de láser. El sistema cuenta con 61200 cristales en el barril y 7324 en las tapas del calorímetro.

Para detener y detectar los jets hadrónicos se diseñó el calorímetro hadrónico (HCAL), de este sistema cierta parte 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 mucha radiación comparado a los otros calorímetros hadrónicos y esto es debido a que está en la dirección del haz incidente, por tanto, los centelladores fueron contruidos de un material centellador 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 están hechas de 3 tecnologías diferentes: Drift Tube Chambers (DT), Cathode Strip Chambers (CSC) y Resistive Plate Chambers (RPC), las 3 están basadas en la detección por ionización de gases: al paso de partículas cargadas se generan corrientes de deriva. En la figura 3 se muestra una recreación a un corte transversal del detector.

## 2.2. Sistema de Trigger.

El LHC fue diseñado para tomar los datos de cada colisión que ocurre, cada una está separada en el tiempo por 25 ns, esto produce un flujo de datos de 1 PB/s (PB=Petabyte). 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 2 fases. [2]



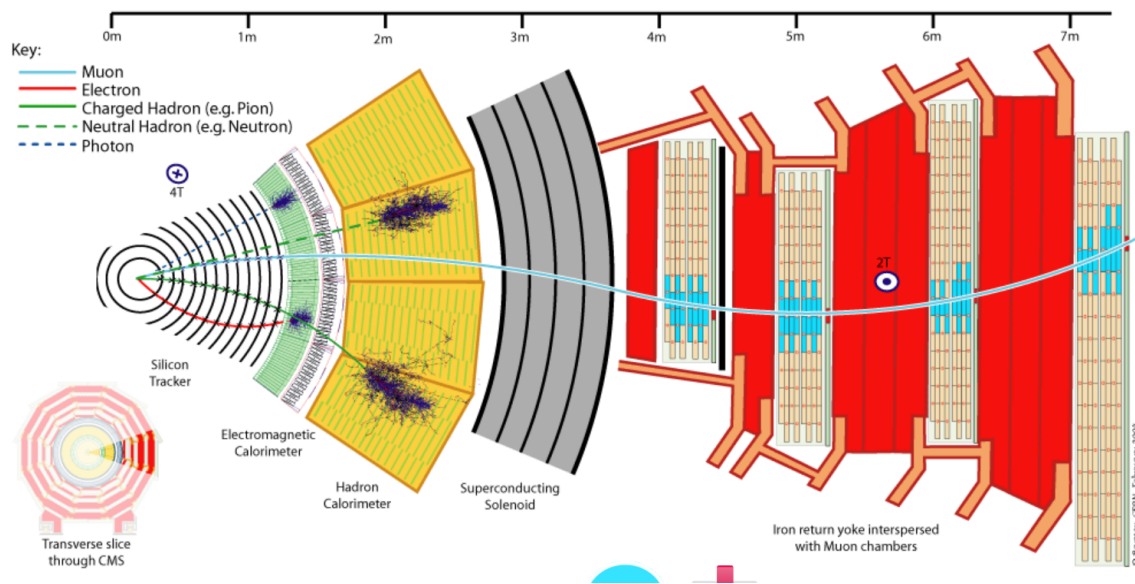


Figura 3: Corte transversal del detector CMS.



La primera de ellas 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: aquellos que contienen partículas con gran momento transversal o por ejemplo con combinaciones raras de estados finales. Este filtro reduce el flujo de datos en 2 órdenes 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) y es un proceso basado en software, una serie de algoritmos corren en granjas de varios miles de procesadores, los códigos han sido previamente implementados con el objetivo de realizar búsquedas predeterminadas y analizan los datos que salen de L1, el tiempo de decisión de este sistema es de aproximadamente 100 ms, al finalizar la selección el flujo original de datos ha sido reducido por un factor de 5 órdenes de magnitud.

### 2.3. Materia oscura en colisionadores.

El modelo estándar de la cosmología predice que solo conocemos como se comporta el 5 % de contenido de materia del universo (materia bariónica), el restante 95 % es: materia oscura (26 %) y energía oscura (69 %) [3], las evidencias 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. [5,6]

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 (SUSY y CP Fuerte 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 fuera más homogéneo de lo que es y tampoco puede interactuar eléctricamente. Otros candidatos para materia oscura surgen de modelos más sencillos como el modelo del dark matter inerte y pueden ser detectados en aceleradores como muestran recientes trabajos. [7,8] Esta búsqueda en particular se basa en la fusión de bosones vectoriales (VBF) ya que el candidato a materia oscura  $H^0$  tiene carga débil. En la figura 4 podemos ver los procesos que contribuyen en este tipo de búsquedas, como vemos de los estados finales en los diagramas (jets que se detectan y el candidato de materia oscura escapa), las búsquedas se basan en energía transversa faltante (MET) asociada a procesos con dos jets con energía transversa  $E_T$  alta y detectados en hemisferios diferentes.

Las búsquedas en aceleradores como el LHC se basan en el rastreo de estados finales de partículas del modelo estándar con energía transversa faltante [7], de esta manera sabríamos que la partícula de materia oscura vivió lo suficiente como para escapar del detector sin decaer, sin embargo esto no dejaría claro que tan estable es la misma para ser materia oscura y por tanto es

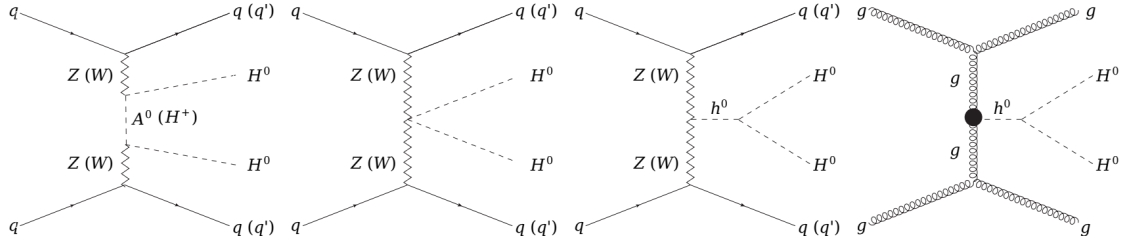




Figura 4: Diagramas de Feynman que contribuyen a  $pp \rightarrow H^0 H^0 jj$ . El punto en la cuarta figura denota el acople entre el Higgs del modelo estándar y los gluones.

necesario complementar la información con experimentos astrofísicos. [9]



### 3. Problema y pregunta de investigación.

Conforme a lo establecido en las secciones anteriores, podemos ver que el problema de encontrar la materia oscura debe resolverse, en parte, mediante la búsqueda de la misma en colisionadores, ya  los visto que modelos como [7,8] motivan búsquedas en **experimentos 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  realizar las búsquedas, por tanto nuestra idea es responder: **¿Qué High Level Trigger para el experimento CMS del CERN con muones de bajo  $p_T$  (momento transversal) es pertinente para su uso en el estudio de señales de materia oscura en el detector?**

## 4. Objetivos y cronograma.

### 4.1. Objetivo general.

Desarrollar y validar un path High Level Trigger (HLT) para el experimento CMS del CERN pertinente para su uso en el estudio de señales de materia oscura con muones de bajo  $p_T$  en el detector.

### 4.2. Objetivos específicos.

- Revisión constante de bibliografía.
- Estudiar la herramienta de construcción de HLT de CMS.
- Estudio del modelo que desea ponerse a prueba, estudiando la señal que quiere detectarse y sus background.
- Construcción de un path del HLT usando la herramienta de CMS.
- Estudiar la eficiencia y otras características de dicho path del HLT y proponerlo.
- Aplicar el HLT al menos a un modelo específico, un ejemplo podrían ser los modelos [7,8].

### 4.3. Cronograma.

Trimestre	2017-3	2017-4	2018-1	2018-2	2018-3	2018-4	2019-1	2019-2
Revisión de bibliografía	*	*	*	*	*	*	*	
Estudio herramienta HLT de CMS.		*	*	*				
Estudio fenomenológico.			*	*				
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 MAD-GRAPH, PYTHIA y DELPHES se necesita acceso a un cluster computacional de mediana capacidad 50 núcleos y 1 TB de almacenamiento. Para el procesamiento de datos provenientes de LHC se necesita acceso a la red computacional de CERN (grid) y esto solo es posible si se es miembro.



## 6. Bibliografía.

- [1] 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, José David Ruiz.
- [2] The CMS trigger system, CMS collaboration.
- [3] Planck Collaboration, P. A. R. Ade et al., Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters, arXiv:1502.01589, Astron. Astrophys. 594, A13 (2016).
- [4] Status of dark matter in the universe, Katherine Freese.
- [5] LIMITS ON STELLAR OBJECTS AS THE DARK MATTER OF OUR HALO: NONBARYONIC DARK MATTER SEEMS TO BE REQUIRED, Katherine Freese et al.
- [6] SChemical Abundance Constraints on White Dwarfs as Halo Dark Matter, Brian D. Fields et al.
- [7] Vector Boson Fusion in the Inert Doublet Model, Bhaskar Dutta, Guillermo Palacio, Diego Restrepo, José D. Ruiz.
- [8] Andres G. Delannoy et al., “Probing Dark Matter at the LHC using Vector Boson Fusion Processes,” Phys. Rev. Lett. 111, 061801 (2013).
- [9] Review of Dark Matter searches at colliders, Sarah Alam Malik.