



UNIVERSIDAD DE SONORA

FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ESTUDIO DEL MODELO DE RUIDO PARA LA MEDICIÓN DE LUMINOSIDAD CON PIXEL CLUSTER COUNTING EN CMS

TESIS

en cumplimiento parcial para conseguir el grado de:

LICENCIADO EN FISICA

Por:

David Alonso Guzmán López

Director:

Dr. Jose Feliciano Benitez Rubio

Hermosillo, Sonora

2025

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, quienes han sido mi mayor apoyo durante todo este proceso. Nunca se echaron para atrás y siempre estuvieron dispuestos a darme las herramientas y el respaldo necesario para llevar a cabo esta tarea. Quiero que sepan que no tengo ninguna queja ni arrepentimientos; al contrario, estoy profundamente agradecido por todo lo que han hecho por mí. Siempre confiaron en mí, siempre me alentaron a ser mejor y, sobre todo, siempre estuvieron a mi lado. Gracias, de todo corazón.

A mis hermanas, Elizabeth y Cinthya, les agradezco su apoyo incondicional en todo momento. Sus risas, sus abrazos y sus palabras de aliento fueron un impulso constante para seguir adelante. Ustedes siempre me recordaron que tengo la capacidad suficiente para completar este proyecto, incluso en los momentos en los que yo mismo dudaba. Gracias por estar ahí, siempre.

Al Dr. Feliciano Benítez, mi director de tesis, quiero expresarle mi más sincero agradecimiento por su paciencia, dedicación y confianza. Siempre tuvo la disposición y el tiempo para explicarme y guiarme paso a paso en este proyecto. Su apoyo constante fue vital para mí; sin su guía, no habría logrado ni la mitad de lo que hoy he conseguido. Estaré eternamente agradecido por sus palabras y por haberme acompañado en este camino.

A mis amigos y a todas las personas que me rodearon durante este proceso, especialmente a Val y Johana, les doy las gracias por empujarme a seguir adelante y por nunca dejarme solo. Su apoyo incondicional y su compañía fueron un faro en los momentos más complicados. Gracias por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía.

Finalmente, y más importante, le doy gracias a Dios. Soy consciente de que esto fue posible porque, en mi debilidad, Él mostró Su fortaleza. Este proyecto, así como mi carrera en general, no hubieran sido posibles sin Su gracia y ayuda constante en mi día a día. A Él le doy toda la gloria y el honor.

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio detallado del modelo de ruido para la medición de luminosidad utilizando el método de conteo de clusters de píxeles (Pixel Cluster Counting, PCC) en el experimento CMS del Gran Colisionador de Hadrones (LHC). La luminosidad es un parámetro fundamental en los experimentos de física de partículas, ya que permite cuantificar la tasa de colisiones y, por ende, la producción de eventos de interés. El método PCC aprovecha la alta granularidad del detector de píxeles de silicio del CMS para medir la luminosidad con una excelente linealidad respecto al número de interacciones por cruce de haces (pile-up).

Se analizan datos adquiridos durante el año 2022, con un enfoque particular en la observación del fenómeno de afterglow, que consiste en señales residuales que afectan las mediciones posteriores a los bunches principales. Se propone un modelo matemático que describe tanto el afterglow tipo 1, de naturaleza electrónica, como el afterglow tipo 2, generado por partículas secundarias provenientes de la activación del material circundante. Además, se estudia la evolución temporal de los parámetros del modelo, lo que permite evaluar la estabilidad y consistencia del mismo. Los resultados obtenidos demuestran la capacidad del método PCC para proporcionar mediciones precisas de luminosidad, contribuyendo así a una mejor comprensión de los efectos que influyen en la detección de partículas en el LHC.

Table of contents

Resumen	iii
List of figures	v
List of tables	vi
1 Introducción	1
1.1 Física de Partículas y el Modelo Estándar	1
1.2 Colisionadores de Partículas y Sección Eficaz de Producción	3
1.3 Luminosidad	6
1.4 El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)	9
2 Descripción del Experimento	12
2.1 CMS (Compact Muon Solenoid)	12
2.2 Luminómetros en CMS	14
2.3 Sistema de Rastreo del CMS	15
2.4 Silicon Pixel Detector	17
2.5 Reconstrucción del Pixel Cluster	19
3 Mediciones de Luminosidad y Afterglow	21
3.1 Pixel Cluster Counting method (PCC)	21
3.2 Datos adquiridos en 2022	23
3.3 PCC sobre la órbita del LHC	24
3.4 Observación del Afterglow	25
3.5 Ajuste de Datos y Residuos	26
3.6 Evolución de los Parámetros en Función del Tiempo	28
4 Conclusiones	30
References	31

List of figures

1.1	Ilustración de la sección eficaz	6
1.2	Interacción entre dos haces de partículas	7
1.3	Incertidumbre de la Luminosidad en un proceso	10
1.4	Complejo LHC	11
2.1	Vista panorámica del detector CMS	13
2.2	Vista transversal del detector CMS.	14
2.3	Luminómetros en CMS	15
2.4	Corte transversal esquemático a través del rastreador del CMS.	16
2.5	Fase 1 del detector de píxeles en CMS	17
2.6	Tipos de módulos en el detector de píxeles	18
2.7	Vista esquemática de un sensor de píxeles y su conexión a los canales de lectura	19
2.8	Construcción de un pixel cluster	20
3.1	Linealidad del PCC con pile-up	22
3.2	Luminosidad integrada acumulada día a día en 2022	23
3.3	Llenado (fill) de una orbita	25
3.4	Gráfica de un tren	26
3.5	Ajuste de los Datos Experimentales	27
3.6	Residuos del Ajuste	28
3.7	Evolución de los parámetros en función del tiempo.	29

List of tables

1.1	Los doce fermiones fundamentales y sus propiedades	2
1.2	Fuerzas experimentadas por los fermiones	3

Chapter 1

Introducción

La física de partículas es una rama de la física que se dedica al estudio de las partículas fundamentales y las fuerzas que constituyen la materia y la radiación en el universo. El Modelo Estándar clasifica a las partículas fundamentales y sus interacciones en dos grandes categorías: los fermiones, que son las partículas que forman la materia, y los bosones, que son las partículas responsables de transmitir las fuerzas fundamentales. Para investigar estas interacciones, se utilizan aceleradores de partículas de alta energía, los cuales permiten medir diversos parámetros y propiedades de las partículas generadas en las colisiones. En este capítulo, se presenta una visión general de las partículas elementales, los colisionadores de partículas y la evaluación de su rendimiento, destacando los conceptos y definiciones clave que son esenciales para la comprensión de este proyecto de tesis.

1.1 Física de Partículas y el Modelo Estándar

El universo está formado por una variedad de partículas diferentes. Los átomos, por ejemplo, están constituidos por electrones (e^-) con carga negativa, que se encuentran en estado ligado orbitando alrededor de un núcleo central. Este núcleo está compuesto por protones (p), que poseen carga positiva, y neutrones (n), que son eléctricamente neutros. Los electrones se mantienen unidos al núcleo debido a la atracción electrostática entre sus cargas opuestas, mientras que los protones y neutrones están cohesionados por la fuerza nuclear fuerte. Además de estas interacciones, también influyen la gravedad y la fuerza débil. La fuerza débil es responsable de fenómenos como la radiactividad nuclear, mientras que la gravedad, aunque extremadamente débil en comparación con las otras fuerzas, es la que determina la estructura del universo a gran escala debido a su naturaleza atractiva universal [1].

A pesar de que este modelo físico es útil para describir la materia a bajas energías, cuando se exploran escalas de energía más altas, se descubren estructuras mucho más complejas. Este tipo de estudios ha permitido identificar 17 partículas fundamentales que constituyen la totalidad del universo conocido. Estas partículas se dividen en dos categorías principales: los fermiones, que son las partículas que forman la materia y tienen un espín de $1/2$, y los bosones, que son los mediadores de las fuerzas fundamentales y presentan un espín entero.

Comenzando con los fermiones, estos componen a la materia en el universo y estos consisten en doce partículas fundamentales las cuales se clasifican en dos grupos: leptones y quarks. A su vez, estos se organizan en tres generaciones,

La materia está compuesta por fermiones, que incluyen un total de doce partículas fundamentales, divididas en dos tipos: los leptones y los quarks. Estas partículas se agrupan en tres generaciones, donde los miembros de generaciones superiores poseen una mayor masa que sus contrapartes en las generaciones anteriores. Los seis leptones se dividen en tres partículas con carga: el electrón (e^-), el muón (μ^-), y el tau (τ^-), junto con sus correspondientes neutrinos: el neutrino electrónico (ν_e), el neutrino muónico (ν_μ), y el neutrino tau (ν_τ).

Por otro lado, los quarks solo existen confinados dentro de hadrones, y su grupo está compuesto por seis tipos: el quark arriba (u), quark abajo (d), quark encanto (c), quark extraño (s), quark cima (t) y quark fondo (b). Las propiedades de estas doce partículas fundamentales se detallan en la Tabla 1.1, proporcionando una visión general de sus características y su papel en la estructura de la materia.

Table 1.1 Los doce fermiones fundamentales y sus propiedades

Leptones					Quarks			
Generación	Partícula	Q	masa/GeV		Partícula	Q	masa/GeV	
Primera	electrón	(e^-)	-1	0.0005	down	(d)	-1/3	0.003
	e -neutrino	(ν_e)	0	$<10^{-9}$	up	(u)	+2/3	0.005
Segunda	muon	(μ^-)	-1	0.106	strange	(s)	-1/3	0.1
	μ -neutrino	(ν_μ)	0	$<10^{-9}$	charm	(c)	+2/3	1.3
Tercera	tau	(τ^-)	-1	1.78	bottom	(b)	-1/3	4.5
	τ -neutrino	(ν_τ)	0	$<10^{-9}$	top	(t)	+2/3	174

Los bosones son las partículas encargadas de mediar las interacciones entre los fermiones, a través del intercambio de partículas denominadas bosones gauge. La fuerza electromagnética es transmitida por el fotón (γ), mientras que la fuerza débil es mediada por los bosones W^\pm y Z^0 , y la fuerza fuerte por los gluones (g). También existe un bosón escalar, el bosón de Higgs, cuya función principal es conferir masa a las partículas fun-

damentales. La Tabla 1.2 presenta un resumen detallado de las fuerzas fundamentales que afectan a los fermiones, mostrando cómo estas fuerzas son transportadas por sus respectivos bosones mediadores.

Table 1.2 Fuerzas experimentadas por los fermiones.

				Electromagnetica	Débil	Fuerte
Leptones	e^-	μ^-	τ^-	✓	✓	
	ν_e	ν_μ	ν_τ		✓	
Quarks	u	c	t	✓	✓	✓
	d	s	b	✓	✓	✓

Las partículas mencionadas están descritas dentro del Modelo Estándar de la física de partículas, el cual es, hasta ahora, la teoría más sólida para explicar con éxito los resultados experimentales. Sin embargo, la mayoría de estos datos provienen de colisionadores de partículas, ya que dichas partículas se pueden producir y estudiar cuando se generan colisiones a energías muy elevadas.

1.2 Colisionadores de Partículas y Sección Eficaz de Producción

En los últimos años, la física de partículas ha logrado grandes avances, impulsados por el uso de aceleradores de partículas de alta energía. Estos dispositivos funcionan como microscópicos muy poderosos, permitiendo examinar las estructuras más pequeñas de la materia y sus partículas fundamentales, tales como electrones, protones, neutrones, neutrinos y quarks. Además, los aceleradores de partículas ofrecen la posibilidad de resolver misterios sobre los componentes desconocidos del universo, como la materia y la energía oscura.

Los colisionadores de partículas aceleran haces de partículas cargadas a velocidades cercanas a la de la luz mediante el uso de campos electromagnéticos. Cuando estos haces chocan a altas energías, se producen interacciones llamadas eventos, en los que se generan varias partículas nuevas (como el bosón de Higgs). La mayoría de estas partículas no se pueden observar directamente, ya que se desintegran rápidamente en otras partículas. Sin embargo, los experimentos con detectores de partículas permiten medir e identificar estas partículas mediante tecnologías y diseños especializados, que se basan en las propiedades de las partículas y sus interacciones con la materia [1].

Un detector de partículas se suele construir en forma de un barril cilíndrico o poligonal, colocado en paralelo con los haces que colisionan. Dos tapas planas en los extremos sellan la estructura, permitiendo una cobertura casi completa del ángulo sólido alrededor del tubo de haces. Este tipo de detector consta de varias capas, cada una diseñada para registrar diferentes partículas creadas durante las colisiones [1].

Los colisionadores de partículas se miden principalmente por dos factores: la energía disponible en el centro de masas y la luminosidad, que es la tasa de colisiones. La cantidad de energía disponible para la creación de nuevas partículas es crucial, ya que define el rango de partículas que pueden producirse y estudiarse. Durante los experimentos, las partículas se aceleran y se dirigen unas contra otras, generando nuevas partículas e interacciones que luego pueden ser analizadas [2].

Los colisionadores de haces enfrentados permiten alcanzar energías extremadamente altas en el punto donde los haces se cruzan. Cuando las partículas en los haces tienen la misma energía y un momentum opuesto (es decir, cuando las masas son iguales), el experimento tiene lugar en el marco de referencia del centro de masas (CM), lo que permite que toda la energía del acelerador se emplee para crear partículas de gran masa. En física de partículas, la cantidad invariante de Lorentz (s) se utiliza para representar el cuadrado de la energía total entrante, y se define como:

$$s = \left(\sum_{i=1,2} E_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1,2} p_i \right)^2 c^2 \quad (1.1)$$

Donde p y E representan el momento y la energía de cada partícula entrante, respectivamente. En el sistema de referencia del centro de masas (CM), donde los momentos de las partículas son iguales pero de direcciones opuestas, el segundo término en la ecuación de la cantidad invariante de Lorentz (s) se anula. Como resultado, la expresión se simplifica a $s = 4E^2$, donde E es la energía de cada partícula en el marco del centro de masas. Esta simplificación es crucial para calcular la energía disponible en las colisiones de partículas [2].

El segundo parámetro importante para evaluar el desempeño de los colisionadores es la luminosidad, que indica la capacidad del acelerador para generar suficientes interacciones. La luminosidad se determina a través de un factor de proporcionalidad entre la probabilidad cuántica de que ocurra una interacción (llamada sección eficaz) y la cantidad de eventos por segundo para un proceso físico específico (R) [3].

En física de partículas, el término sección eficaz tiene un significado especializado que difiere de su uso cotidiano. Mientras que normalmente "sección" hace referencia a una parte o corte de un objeto, en este contexto se refiere a la probabilidad de que dos partículas interactúen durante una colisión, expresada en metros cuadrados. Cuando dos haces de partículas chocan en un acelerador, pueden darse varios procesos, y la sección eficaz de cada uno depende del tipo y la energía de las partículas que colisionan.

Por ejemplo, en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), algunas partículas como los bosones W^\pm y Z^0 tienen secciones eficaces grandes, lo que hace más frecuentes sus observaciones. En cambio, el bosón de Higgs tiene una sección eficaz mucho menor, lo que complica su producción y detección.

Para comprender mejor este concepto, imaginemos un caso simple: un haz de partículas del tipo a atraviesa una región donde hay partículas del tipo b . La tasa de interacciones entre estos dos tipos de partículas depende de la densidad de partículas b por unidad de volumen, denotada como n_b , y del flujo de partículas incidentes a , representado por ϕ_a . La tasa de interacción por partícula objetivo b se puede expresar de la siguiente forma:

$$r_b = \sigma \phi_a$$

El concepto central en la física fundamental se puede describir mediante la sección eficaz de interacción, simbolizada por σ . Este parámetro, que se mide en unidades de área, refleja la probabilidad de que una interacción tenga lugar entre una partícula incidente y una partícula objetivo. Para visualizarlo, se puede pensar que cada partícula objetivo tiene un área efectiva, y la sección eficaz de interacción corresponde a esa área. En la figura 1.1(a), se muestra una representación de este concepto, donde una partícula del tipo a , que viaja con velocidad v_a , se mueve a través de una región con área A , que contiene partículas del tipo b con velocidad v_b en dirección opuesta. El valor de la sección eficaz de interacción depende de la probabilidad cuántica de que ocurra la interacción, lo cual es esencial para entender cómo se comportan las partículas durante las colisiones [1].

Para comprender la probabilidad de una interacción entre partículas de los tipos a y b , supongamos que, durante un intervalo de tiempo δt , la partícula a pasa a través de una región que contiene $\delta N = n_b(v_a + v_b)A\delta t$ partículas de tipo b . La probabilidad de que ocurra una interacción se calcula dividiendo el área total efectiva de la sección transversal de las δN partículas por el área A . Este cálculo puede interpretarse como la probabilidad

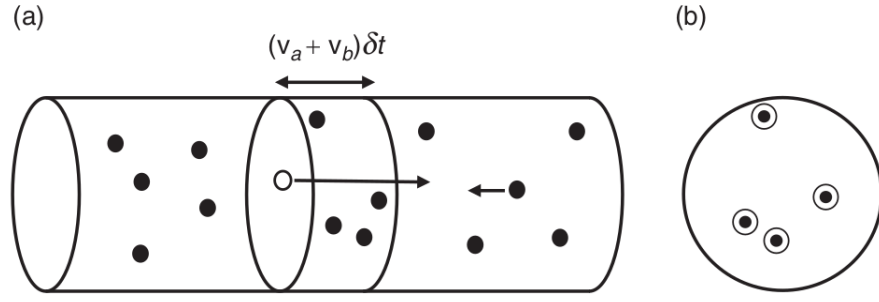


Fig. 1.1 Izquierda (a): haz incidente de partículas de tipo a atravesando una región que contiene partículas de tipo b . Derecha (b): vista proyectada de la región atravesada por la partícula incidente en un intervalo de tiempo δt .

de que la partícula incidente atraviese una de las regiones de área σ que rodean a cada una de las partículas objetivo, tal como se muestra en la figura 1.1(b).

En este sentido, la sección eficaz de un proceso se define como el área efectiva asociada con el objetivo para ese proceso en particular, y se mide en unidades de área. Formalmente, se expresa mediante la ecuación 1.2.

$$\sigma = \frac{\text{número de interacciones por unidad de tiempo por partícula objetivo}}{\text{flujo incidente}} \quad (1.2)$$

1.3 Luminosidad

En los experimentos de física de partículas, el número de interacciones útiles (o eventos) es tan crucial como la energía involucrada. La capacidad de un acelerador de partículas para generar estas interacciones se mide mediante un parámetro llamado "luminosidad instantánea" \mathcal{L}_{inst} . Esta luminosidad es directamente proporcional al número de eventos producidos por segundo y a la sección eficaz σ_p del proceso de interés [4].

$$R = \mathcal{L}_{inst} \cdot \sigma_p \quad (1.3)$$

Donde las unidades de la luminosidad son $cm^{-2}s^{-1}$.

Para derivar una expresión general para la luminosidad en el caso de dos haces que colisionan, consideramos que ambos haces actúan simultáneamente como el objetivo y el haz incidente. Supondremos que los haces están "agrupados", es decir, que las partículas se organizan en paquetes o "bunches".

En este escenario, cada paquete de partículas se considera como una región de alta densidad de partículas que interactúan entre sí. La luminosidad instantánea se puede entonces expresar en términos del número de partículas por paquete, el tamaño del paquete y la velocidad de los haces. El número de interacciones por unidad de tiempo dependerá tanto de la densidad de las partículas en los paquetes como de la sección eficaz de la interacción entre ellas.

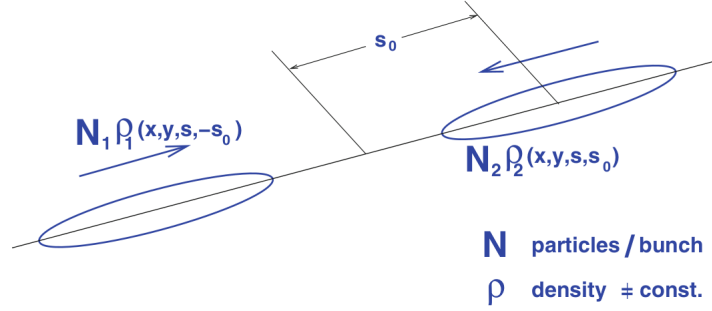


Fig. 1.2 Esquema de una interacción entre dos haces de partículas[4].

En la Figura 1.2 se muestra un diagrama que ilustra cómo dos haces se intersectan entre sí. Dado que estos haces no están estáticos, sino en movimiento, la forma en que se superponen depende del tiempo y la posición de los paquetes de partículas. Mientras los haces se desplazan, también tienen distribuciones y números de partículas diferentes en su interior [4].

La luminosidad instantánea \mathcal{L}_{inst} , que es proporcional a la integral de superposición de los haces, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\mathcal{L}_{inst} \propto K \cdot \int \int \int \int_{-\infty}^{\infty} \rho_1(x,y,s,-s_0) \rho_2(x,y,s,s_0) dx dy ds ds_0 \quad (1.4)$$

Donde las funciones $\rho_1(x,y,s,-s_0)$ y $\rho_2(x,y,s,s_0)$ representan la distribución de densidad del haz en un tiempo t . Ahora, asumimos que los bunches interactúan en el punto $s_0 = 0$. Debido a que los haces están en movimiento y en dirección contraria, debemos considerar un factor cinético relativista de la forma:

$$K = \sqrt{(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)^2 - (\vec{v}_1 \times \vec{v}_2)^2 / c^2} \quad (1.5)$$

Cuando los paquetes de partículas colisionan de manera frontal y se desplazan casi a la velocidad de la luz, el factor cinético relativista toma un valor de 2.

Asumiendo que las densidades son no correlacionadas en todos los planos y que las colisiones son frontales, donde las velocidades de los dos paquetes son opuestas ($\vec{v}_1 = -\vec{v}_2$), la integral de superposición puede factorizarse de la siguiente manera:

$$\mathcal{L}_{inst} = 2N_b N_1 N_2 f \int \int \int \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{1x}(x) \rho_{1y}(y) \rho_{1s}(s-s_0) \rho_{2x}(x) \rho_{2y}(y) \rho_{2s}(s+s_0) dx dy ds ds_0 \quad (1.6)$$

donde N_b es el número de bunches en un haz, N_1 y N_2 son las partículas por bunch y f la frecuencia de revolución.

Suponiendo perfiles gaussianos en todas las dimensiones y longitudes de los paquetes aproximadamente iguales ($\sigma_{1s} \approx \sigma_{2s}$), la ecuación (1.6) se puede resolver para obtener la luminosidad instantánea en función de la superposición de los haces [4].

Para el caso general en el que $\sigma_{1x} \neq \sigma_{2x}$ y $\sigma_{1y} \neq \sigma_{2y}$, las distribuciones de densidad de las partículas en los planos x y y serán diferentes. En este caso, la integral de superposición debe tener en cuenta las diferentes dispersión de los haces en las direcciones transversales, lo que implica que las ecuaciones para calcular la luminosidad instantánea se vuelve mas compleja.

$$\mathcal{L}_{inst} = \frac{N_1 N_2 N_b f}{2\pi \sqrt{\sigma_{1x}^2 + \sigma_{2x}^2} \sqrt{\sigma_{1y}^2 + \sigma_{2y}^2}} \quad (1.7)$$

Asumiendo haces iguales, $\sigma_{1x} = \sigma_{2x}$ y $\sigma_{1y} = \sigma_{2y}$:

$$\mathcal{L}_{inst} = \frac{N_1 N_2 N_b f}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \quad (1.8)$$

Esta expresión es ampliamente reconocida como la fórmula para la luminosidad de dos haces gaussianos que colisionan frontalmente. Muestra cómo la luminosidad está relacionada con el número de partículas en cada paquete y el tamaño de los haces.

En la práctica, la integral en la ecuación (1.6) no se puede resolver de manera analítica debido a que las propiedades de los haces que colisionan no se conocen con precisión. Por lo tanto, se implementa una técnica experimental con una configuración específica de la máquina para estimar estas integrales, obteniendo una expresión similar a la ecuación (1.8).

Para determinar el número total de eventos, utilizamos la luminosidad integrada, que es una medida de la cantidad total de datos recopilados. Este valor es fundamental para evaluar la efectividad de un acelerador, y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\mathcal{L}_{int} = \int_0^T \mathcal{L}_{inst}(t') dt' \quad (1.9)$$

El valor de \mathcal{L}_{inst} se evalúa a lo largo del tiempo T , excluyendo el posible tiempo muerto, ya que su intensidad disminuye a medida que el número de protones se reduce durante las colisiones de cada ciclo de llenado. Por lo tanto, la luminosidad integrada \mathcal{L}_{int} está directamente relacionada con el número de eventos observados según la siguiente expresión:

$$\mathcal{L}_{int} \sigma_p = \text{número de eventos de interés} \quad (1.10)$$

La luminosidad integrada tiene unidades de cm^{-2} y a menudo se expresa en barns inversos. Un barn es equivalente a $10^{-24} cm^2$, lo que facilita la comparación de los resultados experimentales en términos de colisiones efectivas a lo largo del tiempo.

Comprender con precisión la luminosidad es fundamental para los análisis en física, como la búsqueda de nuevas partículas, la medición de las propiedades de partículas conocidas o la detección de procesos raros. La exactitud de nuestras mediciones físicas se ve principalmente afectada por las incertidumbres en la luminosidad. Si se logra aumentar la precisión de las mediciones de luminosidad, los físicos podrán interpretar mejor sus observaciones y explorar áreas de la física que aún desconocemos.

Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 1.3, donde se ilustra la producción de bosones W y Z en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC). En esta figura, las barras de error internas representan las incertidumbres experimentales, mientras que las barras de error externas incluyen las incertidumbres en las predicciones teóricas. Además, la caja sombreada indica las incertidumbres en la medición de la luminosidad, que son mayores que las incertidumbres estadísticas y otras sistemáticas [5].

1.4 El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) es el acelerador de partículas más grande y potente del mundo. Comenzó a operar el 10 de septiembre de 2008 y es la adición más

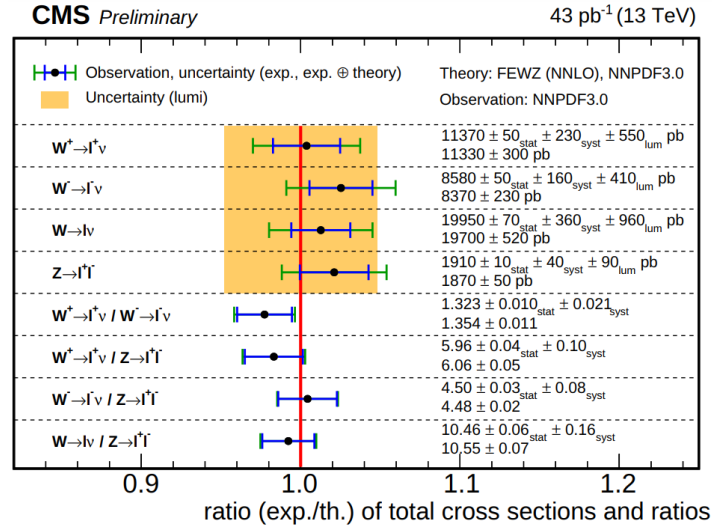


Fig. 1.3 Producción de bosones W^+ , W^- , W y Z y sus predicciones teoricas. La caja sombreada indica las incertidumbres en la medición de la luminosidad, mostrando que estas son mayores que las incertidumbres experimentales (barras azules) y las incertidumbres teóricas (barras verdes). Los valores de las mediciones y las predicciones teóricas se encuentran en la parte derecha de la figura.

reciente al complejo de aceleradores de CERN. El LHC consta de un anillo de 27 kilómetros que contiene imanes superconductores, además de varias estructuras utilizadas para acelerar las partículas mientras se desplazan a lo largo del anillo. Dentro del acelerador, dos haces de partículas viajan a velocidades cercanas a la de la luz hasta que colisionan. Los haces se mueven en direcciones opuestas dentro de tubos separados, que se mantienen en un vacío ultra alto [6].

Los electroimanes superconductores generan un potente campo magnético que guía los haces de partículas a lo largo del anillo del acelerador. Estos imanes están formados por bobinas de un cable eléctrico especial que funciona en un estado superconductor. En este estado, el cable puede conducir electricidad sin resistencia ni pérdida de energía. El acelerador utiliza una variedad de imanes, entre ellos 1232 imanes dipolares de 15 metros de longitud que desvían los haces, y 392 imanes cuadrupolares de entre 5 y 7 metros de longitud que enfocan los haces. Justo antes de la colisión, se emplea un tipo diferente de imán para "comprimir" las partículas, aumentando así la probabilidad de colisiones. Para mantener estos imanes en estado superconductor, deben ser enfriados a una temperatura extremadamente baja de -271.3°C .

El proceso de generar haces de protones para el LHC es complejo y se lleva a cabo en varias etapas. Primero, se ioniza el hidrógeno para obtener protones, los cuales son acelerados en paquetes hasta alcanzar una energía de 50MeV en el Acelerador Lineal

2 (LINAC2). Posteriormente, estos paquetes pasan por tres aceleradores circulares: el Booster, el Sincrotrón de Protones (PS) y el Super Sincrotrón de Protones (SPS), donde se aumenta su energía gradualmente a 1.4GeV , 26GeV y 450GeV , respectivamente. Después de estas fases de preaceleración, los paquetes de protones son inyectados en el anillo del LHC, donde se aceleran aún más hasta alcanzar energías de hasta 7TeV por paquete, mientras circulan en direcciones opuestas. Este ciclo se denomina un "llenado" del LHC y generalmente involucra alrededor de 10^{14} protones, organizados en paquetes que forman el haz de protones. La figura 1.4 muestra una representación esquemática de todo el complejo de aceleradores del CERN.

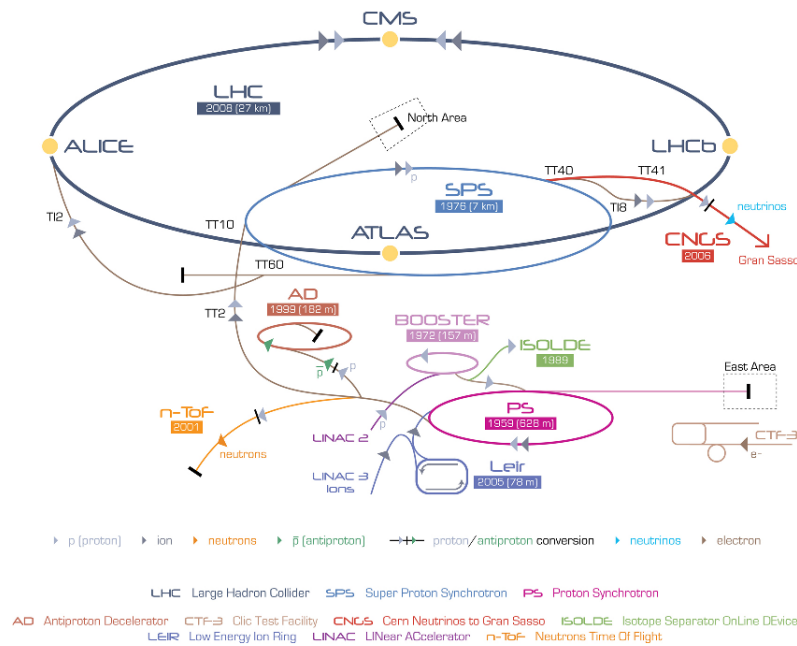


Fig. 1.4 Diagrama de llenado del LHC.

El Centro de Control del CERN es el centro neurálgico encargado de gestionar todos los controles, servicios e infraestructura técnica del LHC. Desde allí, se dirigen los haces de protones para que colisionen en cuatro ubicaciones diferentes a lo largo del anillo del acelerador, las cuales corresponden a las posiciones de cuatro detectores de partículas. CMS y ATLAS son detectores de propósito general diseñados para explorar una amplia variedad de física del Modelo Estándar (SM) y más allá del Modelo Estándar (BSM), mientras que ALICE y LHCb son detectores especializados que se centran en el estudio de fenómenos específicos.

Chapter 2

Descripción del Experimento

Los detectores de propósito general en colisionadores de alta energía suelen tener capas de detección dispuestas en forma cilíndrica alrededor del eje del haz. Un ejemplo destacado de este tipo de detector es el Solenoide Compacto de Muones (CMS), una de las colaboraciones científicas internacionales más grandes de la historia y parte del LHC en el CERN. El CMS está diseñado para llevar a cabo una variedad de experimentos, incluidos los dedicados al estudio del Modelo Estándar. Este capítulo describe los componentes principales del detector CMS, con especial atención a los sistemas encargados de medir la luminosidad, enfocándose particularmente en el rastreador de píxeles de silicio, cuyo detalle es crucial para esta tesis.

2.1 CMS (Compact Muon Solenoid)

El experimento CMS es un detector de propósito general del LHC, compuesto por varias capas dedicadas a funciones específicas. El sistema central es un imán solenoide que genera un campo magnético de 4 teslas, el cual desvía partículas cargadas para medir su energía y momento. El detector tiene 21.6 metros de largo y 14.6 metros de diámetro, con un peso total de 14,000 toneladas [7].

Las partículas cargadas deben ser desviadas al alejarse del punto de colisión, lo que se logra mediante un fuerte campo magnético. Este campo cumple dos funciones clave: primero, permite diferenciar las partículas cargadas positivamente de las negativamente cargadas, ya que se desplazan en direcciones opuestas bajo la influencia del mismo campo magnético; segundo, posibilita la medición del momento de la partícula.

Entre sus componentes, destaca el rastreador de silicio, que permite reconstruir trayectorias de partículas cargadas mediante píxeles y tiras de silicio. Este rastreador registra "hits" en las capas de detección, que luego se usan para calcular la trayectoria de las partículas.

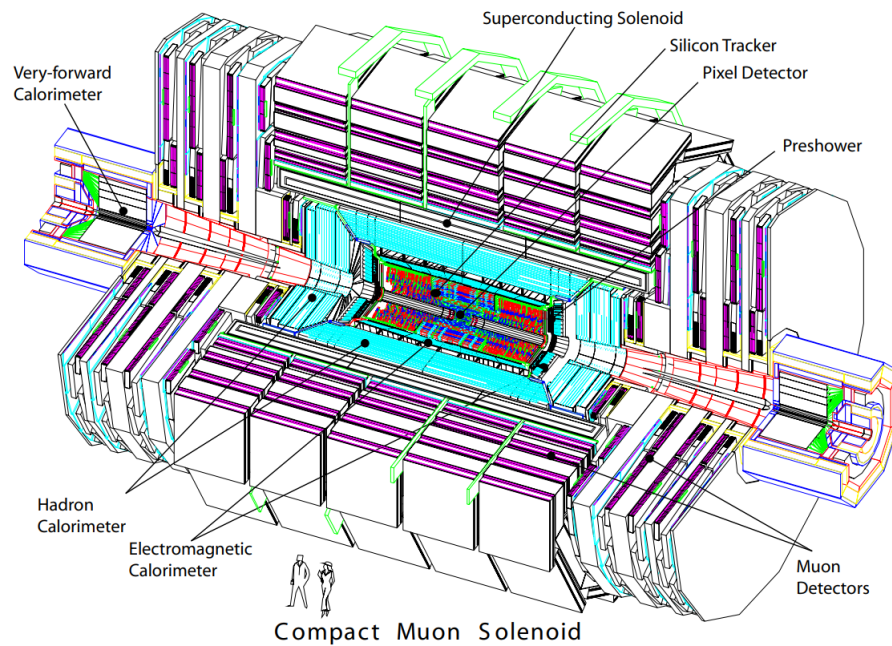


Fig. 2.1 Vista panorámica del detector CMS.

El calorímetro electromagnético (ECAL) mide la energía de electrones y fotones a través de cristales de tungstato de plomo (PbWO_4), mientras que el calorímetro hadrónico (HCAL) detecta hadrones y mide la energía de jets y la energía transversa perdida. Ambos calorímetros cubren diferentes secciones: el barril, los endcaps y el preshower para ECAL, y las secciones forward, endcap, barrel y outer para HCAL [8].

Finalmente, el CMS cuenta con un sistema de detección de muones, que al ser más pesados que los electrones, atraviesan los calorímetros y son detectados en subdetectores ubicados dentro del yugo de acero del solenoide. Estos detectores permiten medir el momento de los muones dentro y fuera del campo magnético del CMS [8].

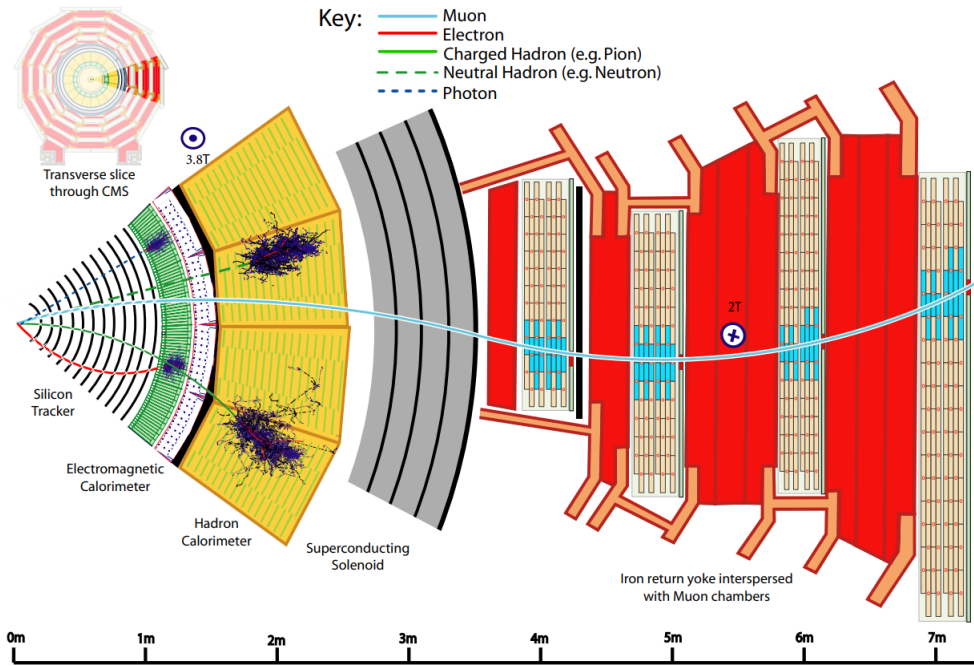


Fig. 2.2 Vista transversal del detector CMS con algunas interacciones de partículas (desde la región de interacción del haz hasta el detector de muones).

El sistema de coordenadas del CMS está centrado en el detector, con el eje y orientado hacia arriba, el x hacia el centro del LHC, y el z alineado con el haz, permitiendo definir parámetros como el ángulo acimutal y la pseudorapidez [8].

2.2 Luminómetros en CMS

El CMS utiliza siete sistemas para medir la luminosidad. Dos de ellos, el Pixel Luminosity Telescope (PLT) y el Fast Beam Condition Monitor (BCM1F), están diseñados específicamente para esta función, mientras que el calorímetro Hadronic Forward (HF) emplea un sistema de lectura dedicado. Además, existen tres métodos más: Drift Tube Luminosity (DT), el Pixel Cluster Counting Method (PCC) y el Vertex Counting Method (VTX), que utilizan datos del detector CMS y su sistema de adquisición de datos. Por último, los detectores RAMSES, destinados al monitoreo ambiental, también contribuyen a las mediciones de luminosidad [9].

El PLT usa sensores de píxeles de silicio distribuidos en telescopios para medir coincidencias triples, lo que permite identificar trayectorias de partículas. En el HF, la medición se realiza con dos algoritmos: HFOC, basado en la ocupación de torres, y HFET, que

usa la energía transversal. El método DT mide la tasa de "muon track stubs", pero no permite mediciones individuales por colisión. El BCM1F, con sensores de silicio y diamante, ofrece mediciones precisas y separa impactos de colisiones de los inducidos por la máquina. RAMSES, aunque no diseñado como luminómetro, puede medir la luminosidad detectando fotones. Finalmente, el PCC cuenta los clústeres de píxeles en el detector, proporcionando una medición adicional de luminosidad [9].

La ubicación de los 7 luminómetros antes mencionados se muestran en la figura 2.3.

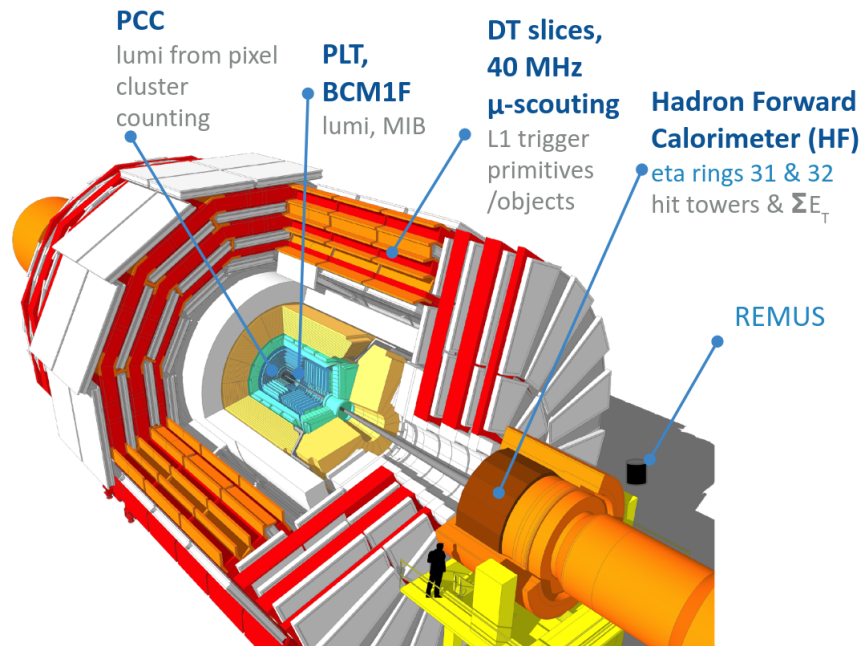


Fig. 2.3 Los siete luminómetros que componen el sistema de medición de luminosidad de CMS son: BCM1F, HFET, HFOC, PLT, REMUS, DT y PCC.

2.3 Sistema de Rastreo del CMS

El sistema de rastreo en el CMS es esencial para medir con precisión las trayectorias y momentos de las partículas cargadas y para reconstruir vértices secundarios. Este sistema tiene 5.8 metros de largo y 2.5 metros de diámetro, y está compuesto por dos subsistemas principales: el detector de píxeles y el rastreador de tiras (Strip tracker). El detector de píxeles se encuentra en el centro, rodeado por el rastreador de tiras, como se ilustra en la Figura 2.4 [9].

El rastreador de tiras se divide en el Tracker Inner Barrel (TIB) y Tracker Inner Disks (TID), que tienen cuatro capas de barril y tres discos en cada endcap, y el Tracker Outer Barrel (TOB) junto con los Tracker EndCaps (TEC), que consisten en seis capas y nueve discos en los extremos. Este sistema cubre 198 m^2 con 15,148 módulos de silicio y alrededor de 9.3 millones de tiras, proporcionando una alta resolución en la medición de trayectorias.

El sistema permite medir la curvatura de las partículas en el campo magnético del solenoide, lo que facilita determinar su momento. Es crucial para identificar partículas como muones y electrones, y para reconstruir eventos complejos de colisiones de alta energía.

El rastreador de píxeles, la parte más interna, consta de cuatro capas concéntricas en el barril y tres discos en los endcaps. Con 124 millones de píxeles, permite una resolución extremadamente alta para medir las trayectorias de las partículas cercanas al punto de interacción. Su cobertura llega a una pseudorapidez de $|\eta| < 2.5$ y es clave para detectar partículas en eventos de alta densidad.

Los píxeles en cada capa se organizan en una matriz, permitiendo la medición de las coordenadas en dos dimensiones (r, z), lo que contribuye a la reconstrucción precisa de las trayectorias de las partículas. En la siguiente sección, se detallarán más aspectos técnicos de este detector, incluyendo su funcionamiento y las características que lo hacen fundamental en la reconstrucción de eventos a alta precisión.

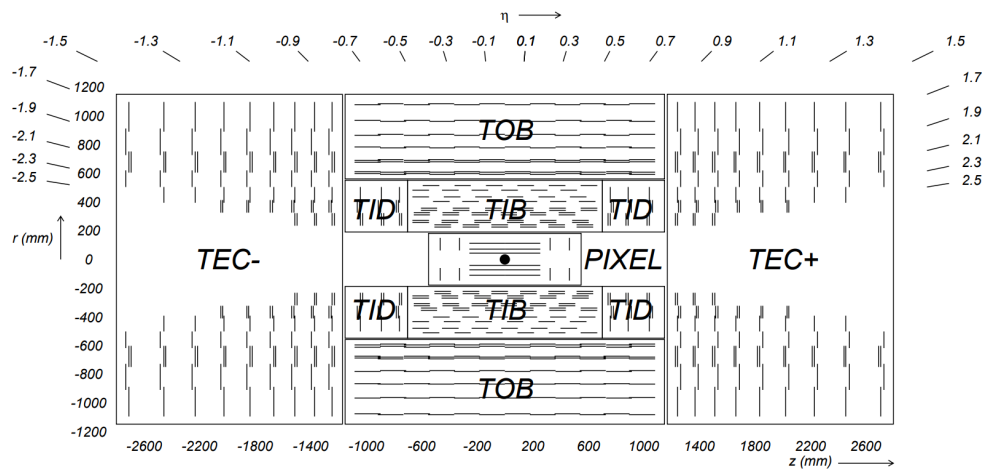


Fig. 2.4 Corte transversal esquemático a través del rastreador del CMS.

2.4 Silicon Pixel Detector

El detector de píxeles de silicio forma el componente más interno del sistema de rastreo. Este detector proporciona una cobertura espacial completa en el área más cercana al punto de interacción, lo que permite un seguimiento preciso de las partículas cargadas y la reconstrucción de vértices. La cobertura del detector de píxeles se encuentra en el rango de pseudorapidez ($|\eta| < 2.5$), operando en un entorno rico en radiación, caracterizado por una alta densidad de trayectorias [10].

El detector de píxeles del CMS está compuesto por cuatro capas concéntricas en forma de barril (L1-L4), cada una con radios de 29, 68, 109 y 160 mm, y tres discos (D1-D3) en cada extremo, ubicados a distancias de 291, 396 y 516 mm del centro del detector. Todo el detector consta de 1856 módulos de sensores de silicio segmentados [7].

La Figura 2.5 muestra un esquema de la disposición del detector de píxeles de la Fase 1 del CMS, el cual cubre un área total de silicio de $1.9m^2$. Los detectores BPIX y FPIX están equipados con cuatro medios cilindros de servicio cada uno, que tienen una longitud combinada de 540mm. Estos cilindros albergan los circuitos de lectura y control, además de proporcionar soporte para las líneas de alimentación y los tubos de refrigeración del detector [10].

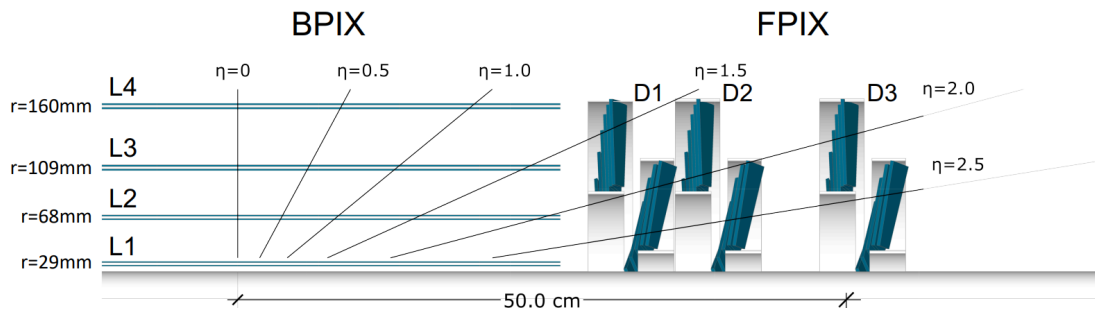


Fig. 2.5 Disposición del detector de píxeles de la Fase 1 del CMS en vista longitudinal.

El detector BPIX está compuesto por dos mitades independientes, cada una de estas es autosuficiente desde el punto de vista mecánico. Cada mitad incluye un medio detector y dos semi-cilindros de servicio. Este detector consta de 1184 módulos de sensores de silicio segmentados, y la orientación de las superficies de cada módulo es paralela al campo

magnético en ambas mitades.

A diferencia del BPIX, el detector FPIX está dividido en cuatro cuadrantes, que operan de manera independiente entre sí. Cada cuadrante incluye tres medio-discos que se alojan dentro de un semi-cilindro de servicio. La disposición de los sensores se ajusta de modo que el lado más largo de los píxeles esté alineado radialmente. El detector FPIX está compuesto por un total de 672 módulos de sensores de silicio segmentados, que se distribuyen entre anillos internos y externos, con 22 y 34 módulos respectivamente.

Un módulo del detector de píxeles está formado por un sensor de silicio plano con dimensiones de $18.6 \times 66.6 \text{ mm}^2$, que abarca un área activa de $116.2 \times 64.8 \text{ mm}^2$. Este sensor está compuesto por 160×416 píxeles, que están conectados a una matriz de 2 por 8 chips de lectura (ROC) mediante una soldadura de bump. Cada chip de lectura contiene 4160 canales, encargados de medir la altura del pulso de cada píxel. En total, el detector cuenta con 124 millones de canales de lectura. El tamaño estándar de cada píxel es de $100 \times 150 \mu\text{m}^2$.

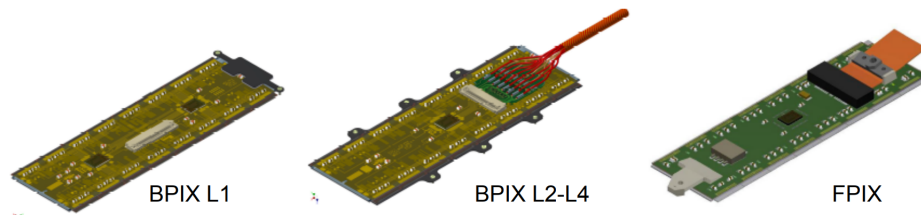


Fig. 2.6 Estas son ilustraciones de los módulos del detector de píxeles utilizados en los detectores BPIX L1 (izquierda), BPIX L2-L4 (centro) y FPIX (derecha).

La Figura 2.6 ilustra los módulos del detector de píxeles de la Fase-1 del CMS, mientras que la Figura 2.7, a la izquierda, muestra el diseño del sensor de silicio conectado al chip de lectura. En el lado derecho de la Figura 2.7, se puede ver una partícula cargada atravesando un píxel, proporcionando suficiente energía para expulsar electrones de los átomos de silicio. Un voltaje aplicado al sensor permite la recolección de estas cargas como una pequeña señal eléctrica, que luego es amplificada por un chip electrónico de lectura [10].

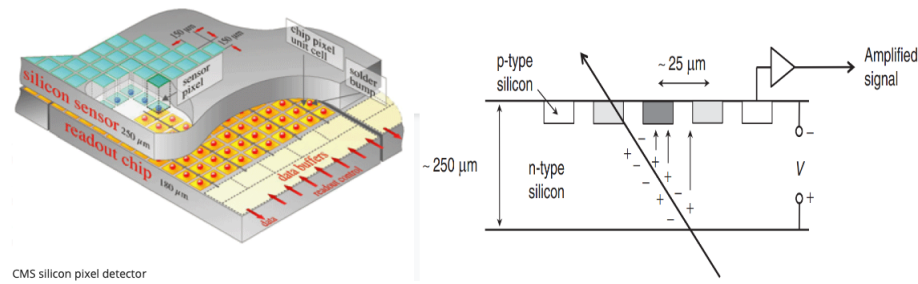


Fig. 2.7 Izquierda: diseño del sensor de píxeles conectado a un chip de lectura. Derecha: detección de impactos en un píxel correspondiente del sensor.

2.5 Reconstrucción del Pixel Cluster

El proceso de reconstrucción de trayectorias involucra varios pasos. Primero, se identifican las señales que superan un umbral específico en los canales de píxeles y se utilizan para crear clústeres. Cada clúster representa la carga depositada por una sola partícula cargada. Posteriormente, se estiman la posición y las incertidumbres de los clústeres en un sistema de coordenadas local y ortogonal con respecto al plano del sensor [11].

Para que un clúster sea considerado válido, debe tener una carga de al menos 4000 electrones [11, 10]. Las partículas mínimamente ionizantes (MIP) que atraviesan un sensor de silicio con un grosor de $285 \mu m$ suelen depositar una energía equivalente a unos 21,000 electrones cuando inciden normalmente. Sin embargo, esta carga generalmente se dispersa en más de un píxel debido a la deriva de Lorentz, que provoca que los electrones sean desplazados por la fuerza generada por el campo electromagnético, lo que lleva a la formación de clústeres de carga.

La Figura 2.8 muestra un ejemplo de cómo se construye un clúster de píxeles. Cada cuadro en la figura representa un píxel. Los píxeles rojos indican que tienen la carga requerida, de hasta 2000 electrones, para ser considerados píxeles válidos y, por lo tanto, se incluyen en el clúster. Por otro lado, los píxeles verdes corresponden a depósitos de carga por debajo del umbral de 2000 electrones y no se incluyen en el clúster. La línea azul punteada en la figura representa la trayectoria de la partícula que viaja paralela al plano xz . A medida que avanza, activa píxeles en su camino de manera precisa, así como píxeles que se desvían de su trayectoria debido a la deriva de Lorentz [12].

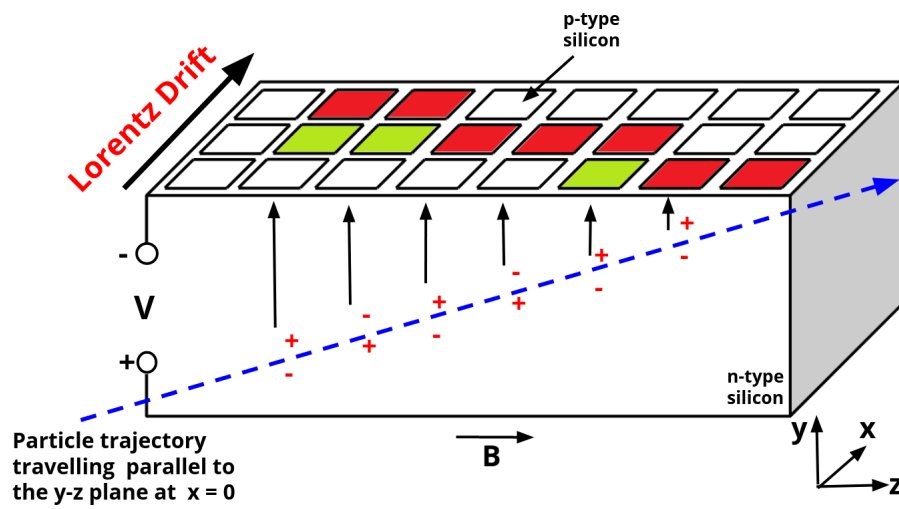


Fig. 2.8 La figura ilustra un ejemplo de un clúster de píxeles con una carga total de 4,000 electrones, que es el umbral necesario para que el clúster sea válido. Los píxeles rojos tienen la carga requerida, mientras que el píxel verde no alcanza el umbral.

Chapter 3

Mediciones de Luminosidad y Afterglow

La medición precisa de la luminosidad suministrada al experimento CMS por el LHC es fundamental por varias razones. En tiempo real, la medición de la luminosidad ofrece información sobre el rendimiento del LHC y CMS, incluyendo el monitoreo de las tasas de activación de los disparadores. En el análisis fuera de línea, la luminosidad es un componente clave para calcular la sección eficaz de los procesos observados o para establecer límites superiores en la búsqueda de procesos más allá del modelo estándar.

Como se ha mencionado, para medir la luminosidad en CMS se utilizan un total de siete luminómetros, cada uno de los cuales mide una cantidad específica en el detector, como impactos, trazas o cúmulos. La tasa R medida por el luminómetro es proporcional a la luminosidad instantánea \mathcal{L}_{inst} , con una constante de proporcionalidad dada por la sección eficaz visible σ_{vis} .

$$R(t) = \mathcal{L}_{inst} \sigma_{vis} \quad (3.1)$$

La determinación de σ_{vis} se realiza mediante escaneos de van der Meer (vdM) utilizando una configuración especial del LHC.

3.1 Pixel Cluster Counting method (PCC)

El método PCC utiliza el número promedio de cúmulos (clústers) de píxeles en el detector de píxeles de silicio del CMS para determinar una medición de luminosidad offline. Este método aprovecha la alta densidad de píxeles en la región interna del sistema de rastreo de CMS. Esto significa que la probabilidad de que un solo píxel sea impactado por dos partículas cargadas provenientes del mismo cruce de haces es extremadamente baja. Esta gran granularidad y baja ocupación proporcionan mediciones con una excelente respuesta

lineal respecto al pile-up (número de interacciones por cruce de haces) μ . En promedio, la ocupación del detector es inferior al 0.1% [13].

La Figura 3.1 muestra una simulación con eventos de colisión pp de cero sesgo, en la que se presenta la tasa de conteo de clústers de píxeles como una función del pile-up en el rango observado en la Run 2, que va de 0 a aproximadamente 50μ . El número promedio de clusters de píxeles es del orden de 111 por evento. La curva roja es un ajuste polinomial de primer orden con pendiente. Los resultados indican un alto nivel de concordancia, evidenciado por el ajuste estimado de bondad de ajuste χ^2 por grado de libertad (dof), de aproximadamente 0.5, lo que demuestra que la tasa PCC es altamente lineal en este rango bajo condiciones simuladas [14, 13].

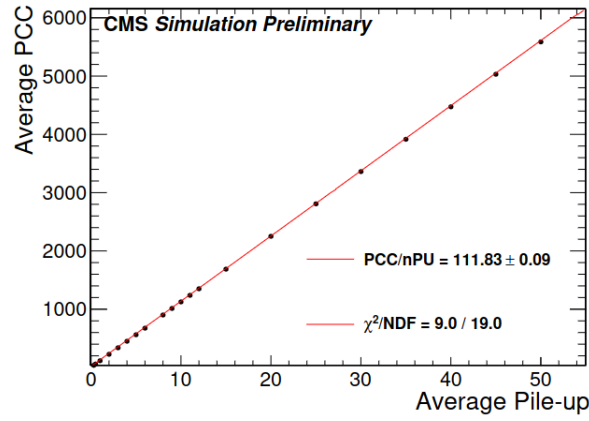


Fig. 3.1 Linealidad del conteo de clústers de píxeles en el rango de pile-up observado en la Run 2 (de 0 a aproximadamente 50) a partir de simulaciones. La línea roja es un ajuste lineal a los puntos.

Para obtener el número promedio de clústers de píxeles por evento, se promedian varios eventos de cero sesgo. Este valor se define como::

$$\langle N_{\text{cluster}} \rangle \equiv \langle N_{\text{cluster/interaction}} \rangle \mu \quad (3.2)$$

Bajo condiciones de sesgo mínimo, μ se puede expresar como:

$$\mu = \frac{\sigma_{\text{minBias}}}{f} \cdot \mathcal{L}_{\text{inst}} \quad (3.3)$$

donde f es la frecuencia de revolución del LHC y $\mathcal{L}_{\text{inst}}$ es la luminosidad instantánea de un solo paquete (SBIL, por sus siglas en inglés). La sección eficaz de sesgo mínimo

($\sigma_{\text{extminBias}}$) está relacionada con la sección eficaz visible del PCC mediante el número promedio de clústers por interacción:

$$\sigma_{\text{vis}} = \langle N_{\text{cluster/interaction}} \rangle \cdot \sigma_{\text{minBias}} \quad (3.4)$$

Juntando todo, la luminosidad obtenida será:

$$\mathcal{L}_{\text{inst}} = \frac{\langle N_{\text{cluster}} \rangle}{\sigma_{\text{vis}}} \cdot f \quad (3.5)$$

3.2 Datos adquiridos en 2022

El 12 de julio de 2022, comenzó la recolección de datos para Run 3 del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), lo que resultó en una luminosidad total registrada de 38.48 fb¹ durante ese año. Estos datos se recolectaron durante colisiones protón-protón con una energía en el centro de masa de $s = 13.6$ TeV. El periodo de recolección de datos comenzó con el inicio de los haces estables y concluyó cuando el haz fue detenido intencionalmente o cuando se interrumpieron los haces estables momentáneamente para realizar estudios del haz. La luminosidad entregada por el LHC al CMS (representada en azul) y la luminosidad registrada por CMS (mostrada en naranja) durante este periodo se ilustran en la Figura 3.2 [15].

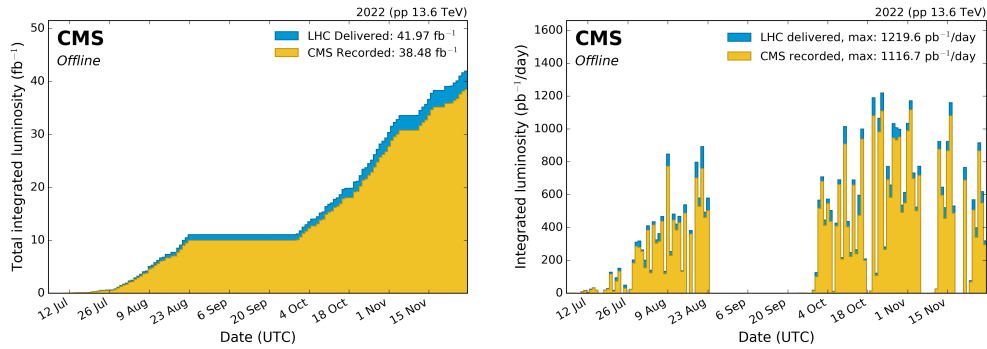


Fig. 3.2 (izquierda) Luminosidad integrada acumulada día a día. (derecha) Luminosidad integrada día a día en 2022, como el primer gráfico, pero no acumulativa.

3.3 PCC sobre la órbita del LHC

En esta sección se presenta el análisis del Pixel Cluster Counting (PCC) a lo largo de toda la órbita del LHC, que comprende 3564 espacios disponibles para colisiones (buckets). El objetivo es estudiar cómo varía el conteo de cúmulos de píxeles en función de la posición de las interacciones dentro de la órbita y analizar la estructura específica de los trenes de protones y las secciones vacías entre ellos.

El LHC no utiliza todos los espacios disponibles para colisiones de manera continua; en su lugar, los protones se agrupan en lo que se conocen como trenes. Cada tren está compuesto por una serie de bunches o "vagones", que son grupos de protones que circulan de manera sincronizada alrededor del anillo del acelerador. Entre estos trenes existen espacios vacíos llamados gaps, que se emplean para evitar la superposición de señales no deseadas y permitir la estabilidad del sistema de inyección de los haces.

La gráfica obtenida (Figura 3.3) muestra el número de clusters de píxeles contados por el sistema PCC a lo largo de toda la órbita del LHC, lo cual incluye tanto las regiones donde ocurren colisiones como las regiones de espacio vacío donde no hay interacciones. En la gráfica, los trenes de protones son claramente identificables como picos que se agrupan en ciertas regiones, mientras que las secciones vacías entre los trenes aparecen como caídas abruptas en el conteo de clusters.

En la gráfica, los trenes de protones son observados como series de bunches sucesivos que producen un alto número de cúmulos de píxeles en el detector de CMS. A medida que el haz de protones interactúa con los bunches, los cúmulos de píxeles detectados aumentan significativamente debido a las colisiones de partículas dentro del detector.

Los gaps son esenciales para prevenir la acumulación excesiva de efectos indeseables, como el afterglow o el ruido residual, y garantizar un funcionamiento estable del sistema de inyección y detección.

Esta gráfica es fundamental para visualizar cómo se distribuyen las colisiones y los espacios vacíos a lo largo de la órbita, lo que permite comprender mejor la estructura de los bunches y el impacto de los trenes en el conteo de cúmulos de píxeles.

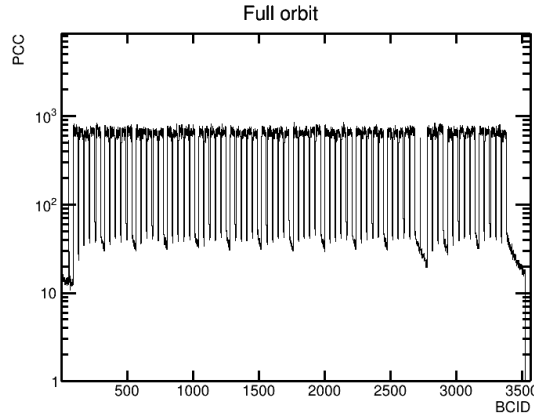


Fig. 3.3 Se presenta el número de clusters de píxeles contados por el sistema PCC a lo largo de toda la órbita del LHC, mostrando la estructura de trenes y gaps entre bunches.

3.4 Observación del Afterglow

En la Figura 3.4 se presenta un tren de bunches con la medición del número de clusters de píxeles detectados por el método PCC a lo largo de un tren de bunches en la órbita. En este caso, se puede observar el fenómeno conocido como afterglow, que afecta las mediciones posteriores a los bunches principales debido a la persistencia de señales residuales en el detector. Este afterglow se divide en dos tipos:

El **afterglow de tipo 1** es el resultado de un desbordamiento de la señal electrónica de un bunch crossing ID (BCID) al siguiente. En otras palabras, la señal medida en un bunch es afectada por un rezago de la señal electrónica de bunches anteriores. Este fenómeno es notable en la caída abrupta de las mediciones de PCC justo después de los bunches activos, tal como se muestra en la gráfica. La contribución del afterglow tipo 1 es predominantemente electrónica y tiene una caída rápida en los bunches inmediatamente posteriores al bunch principal.

El **afterglow de tipo 2** proviene de partículas secundarias generadas por la activación del material circundante debido a las interacciones del haz principal. Estas partículas tienen vidas medias más largas y decaen exponencialmente con el tiempo, lo que genera una señal residual en bunches posteriores durante un intervalo de tiempo más extenso. A diferencia del afterglow tipo 1, la caída del afterglow tipo 2 es más gradual, y está presente a lo largo de un rango más amplio de BCIDs, como se observa en la gráfica en bunches posteriores a los 40 BCID.

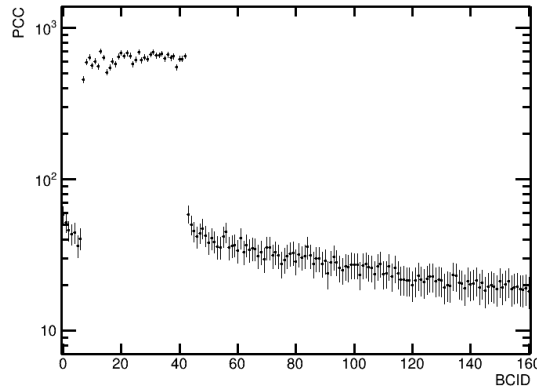


Fig. 3.4 La gráfica permite visualizar claramente ambos tipos de afterglow: el afterglow tipo 1 es visible en la caída abrupta en los primeros BCIDs (cerca del BCID 40), mientras que el afterglow tipo 2 se manifiesta como una disminución exponencial más suave a lo largo de los bunches posteriores (más allá del BCID 40).

3.5 Ajuste de Datos y Residuos

Para ajustar los datos obtenidos en la medición del número de clusters de píxeles detectados, se utiliza un modelo compuesto que describe tanto el fenómeno de afterglow de tipo 1 como el de tipo 2, así como la contribución residual de interacciones previas. El modelo que se emplea para el ajuste de los datos está dado por la siguiente expresión analítica:

$$f(x) = \sum_{k=0}^{N-1} n_k \left[\delta_{x,x_k} + A \cdot \delta_{x,x_k+1} + B_k \cdot e^{-C_k(x-x_k)} \cdot \Theta(x-x_k) \right] + D \cdot e^{-E \cdot x}$$

Donde los términos son definidos de la siguiente manera:

- δ_{x,x_k} : Delta de Kronecker, que representa un pico en la medición exactamente en x_k , correspondiente a la señal principal del bunch colisionante.
- A : Amplitud del afterglow tipo 1, que es constante para todos los BCIDs.
- δ_{x,x_k+1} : Delta de Kronecker que representa el afterglow tipo 1 en el BCID inmediatamente siguiente ($x_k + 1$).
- B_k : Amplitud del afterglow tipo 2, que describe el decaimiento exponencial debido a la generación de partículas secundarias por activación del material circundante.

- C_k : Tasa de decaimiento exponencial del afterglow tipo 2.
- $\Theta(x - x_k)$: Función escalón de Heaviside, que asegura que el decaimiento exponencial del afterglow tipo 2 solo se aplique para $x \geq x_k$.
- D : Amplitud del ruido residual.
- E : Tasa de decaimiento exponencial del ruido residual.

Este modelo compuesto tiene en cuenta tanto las contribuciones puntuales de los bunches colisionantes como el comportamiento más gradual del afterglow tipo 2, además de la influencia de colisiones previas que pueden generar señales persistentes en el detector.

A continuación, se presenta un ajuste de los datos experimentales utilizando este modelo. En la Figura 3.5, se observa el resultado del ajuste realizado a los datos obtenidos mediante el método Pixel Cluster Counting (PCC). El ajuste incluye tanto los picos asociados al afterglow de tipo 1, como las contribuciones del afterglow tipo 2 y la componente residual de interacciones previas.

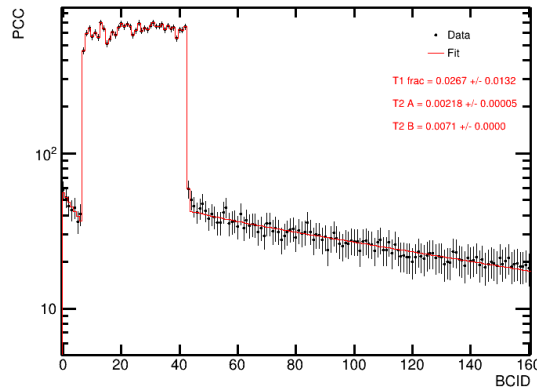


Fig. 3.5 Ajuste de los datos obtenidos mediante el método Pixel Cluster Counting (PCC) utilizando el modelo compuesto que incluye las contribuciones del afterglow tipo 1, tipo 2 y residual. Los parámetros A_k , B_k , C_k , D y E son ajustados a los datos experimentales, mostrando cómo el modelo describe las señales detectadas a lo largo de los bunches.

Por otro lado, se muestran los residuos del ajuste en la Figura 3.6, que representan la diferencia entre los datos observados y el modelo ajustado. Estos residuos permiten evaluar la calidad del ajuste y detectar posibles desviaciones o inconsistencias en la modelización de los datos.

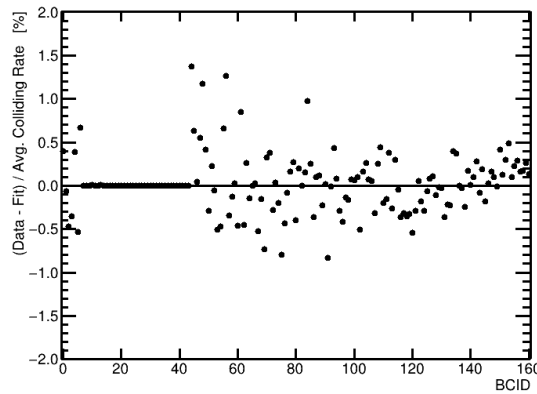


Fig. 3.6 Residuos del ajuste realizado a los datos experimentales, representando la diferencia entre los datos observados y el modelo ajustado. Los residuos se distribuyen alrededor de cero, lo que indica la calidad del ajuste y la capacidad del modelo para capturar las características del fenómeno observado.

El análisis de los residuos es fundamental para asegurar que el modelo propuesto sea adecuado para describir el comportamiento del afterglow en los datos experimentales. Los residuos deben distribuirse de manera aleatoria alrededor de cero, sin patrones sistemáticos, lo que indicaría que el modelo ha capturado de manera adecuada las características del fenómeno observado.

3.6 Evolución de los Parámetros en Función del Tiempo

En esta sección, se presenta un análisis de la evolución temporal de los parámetros del modelo matemático utilizado para ajustar los datos obtenidos mediante el método de conteo de clusters de píxeles (Pixel Cluster Counting, PCC). Como se describió en la sección 3.5, el modelo matemático empleado para el ajuste de los datos incluye contribuciones del afterglow tipo 1, tipo 2 y una componente residual de interacciones previas. Los parámetros clave del modelo son A , B_k , C_k y E , cuyas propiedades ya fueron definidas en la sección anterior.

Para analizar la evolución de estos parámetros en función del tiempo, se realizó un ajuste de los datos utilizando el modelo descrito en la sección 3.5. Los valores de los parámetros A y B_k se obtuvieron para diferentes momentos durante la toma de datos, lo que permitió graficar su comportamiento a lo largo del tiempo.

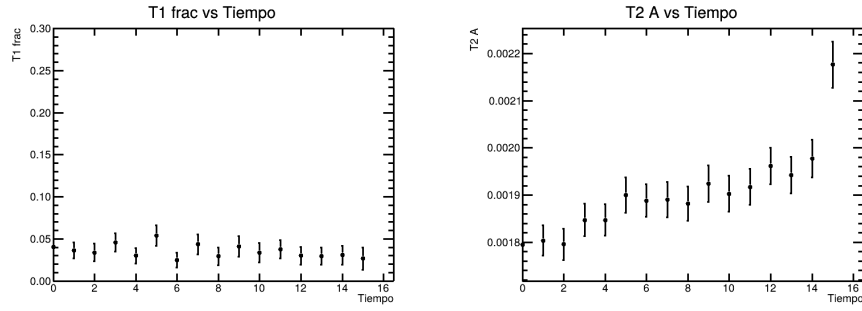


Fig. 3.7 Evolución de los parámetros en función del tiempo.

Las gráficas obtenidas permiten evaluar la consistencia del modelo matemático utilizado para el ajuste de los datos. Si los parámetros $T1_frac$ y $T2A$ muestran una evolución estable a lo largo del tiempo, esto sugiere que el modelo es robusto y capaz de capturar adecuadamente las características del afterglow en diferentes condiciones experimentales. Por otro lado, fluctuaciones significativas en los parámetros podrían indicar la necesidad de ajustar el modelo o considerar factores adicionales que no han sido incluidos en el análisis inicial.

En resumen, el análisis de la evolución temporal de los parámetros del modelo proporciona información valiosa sobre la dinámica del afterglow en el detector CMS. Estos resultados son fundamentales para garantizar la precisión de las mediciones de luminosidad y para mejorar la comprensión de los efectos que influyen en la detección de partículas en el LHC.

Chapter 4

Conclusiones

En esta tesis se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo del modelo de ruido para la medición de luminosidad utilizando el método de conteo de clusters de píxeles (PCC) en el experimento CMS. A través de este estudio, se ha demostrado que el método PCC es una herramienta robusta y precisa para medir la luminosidad, gracias a su alta granularidad y baja ocupación en el detector de píxeles de silicio. La observación y caracterización del afterglow, tanto de tipo 1 como de tipo 2, ha permitido comprender mejor los efectos residuales que influyen en las mediciones de luminosidad, lo que es crucial para garantizar la precisión de los datos obtenidos en el LHC.

El modelo matemático propuesto, que incluye contribuciones del afterglow y del ruido residual, ha mostrado un buen ajuste a los datos experimentales, como lo evidencian los residuos distribuidos aleatoriamente alrededor de cero. Además, el análisis de la evolución temporal de los parámetros del modelo ha revelado que estos presentan un comportamiento estable a lo largo del tiempo, lo que refuerza la validez del modelo utilizado.

En resumen, este trabajo contribuye a mejorar la precisión de las mediciones de luminosidad en el experimento CMS, lo que es fundamental para la búsqueda de nuevas partículas, la medición de las propiedades de partículas conocidas y la detección de procesos raros. Los resultados obtenidos abren nuevas perspectivas para futuros estudios en física de partículas, especialmente en lo que respecta a la optimización de los métodos de medición de luminosidad en colisionadores de alta energía.

References

- [1] M. Thomson, *Modern Particle Physics*, Cambridge University Press, New York, 2013.
- [2] A. Belyaev and R. Douglas, *The Basics of Nuclear and Particle Physics*, Springer (Undergraduate Texts in Physics Series), Switzerland, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80116-8>.
- [3] S. Myers and H. Schopper, *Particle Physics Reference Library, volume 3*, Springer, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34245-6>.
- [4] W. Herr and B. Muratori, "Concept of Luminosity", CERN Document Server, 2016, doi : 10.5170/CERN-2006-002.361.
- [5] CMS Collaboration, "Measurement of inclusive W and Z boson production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV", CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-SMP-15-004, 2015.
- [6] Online article: "The Large Hadron Collider", 2023, URL <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.
- [7] CMS Collaboration, "The CMS experiment at the CERN LHC", *JINST* **3** S08004, 2008, doi: 10.1088/1748-0221/3/08/s08004.
- [8] A.M. Sirunyan et al, "Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector", *JINST* **12** P10003, 2017, doi: 10.1088/1748-0221/12/10/p10003.
- [9] CMS Collaboration, "CMS luminosity measurement for the 2018 data-taking period at $\sqrt{s} = 13$ TeV", CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-LUM-18-002, 2019.
- [10] W. Adam et al, "The CMS Phase-1 pixel detector upgrade", *JINST* **16** P02027, 2021, doi: 10.1088/1748-0221/16/02/p02027.
- [11] CMS Collaboration, "Description and performance of track and primary-vertex reconstruction with the CMS tracker", *JINST* **9** P10009, 2014, doi: 10.1088/1748-0221/9/10/p10009.
- [12] D. A. Giurgiu, "Pixel Hit Reconstruction with the CMS Detector", physics.ins-det **2**, 2008, arXiv:0808.3804.
- [13] CMS Collaboration, "Precision luminosity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV in 2015 and 2016 at CMS", *Eur. Phys. J. C* **81** 800, 2021, doi: 10.1140/epjc/s10052-021-09538-2, arXiv: 2104.01927.

-
- [14] CMS Collaboration, "The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation, Instrumentation, and Luminosity Detectors: Conceptual Design", CMS-NOTE-2019-008, 2020.
- [15] Online resource: "CMS Luminosity - Public Results", 2023, URL <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/LumiPublicResults> .