



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CELDA  
PARA UN MONITOR DE RADIACIÓN CON FUENTES DE  
BAJAS ENERGÍAS.

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**Doctor en Ciencias Física Aplicada**

PRESENTA:

**Edmundo Márquez Quintos**

ASESORES:

Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández & Dr. Eduardo Moreno Barbosa



Puebla, Puebla, Noviembre 2024







# Agradecimientos

---

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por la beca otorgada para la realización de mis estudios de doctorado en física aplicada.



# Declaración de autenticidad

---

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Edmundo Márquez Quintos. Puebla, Puebla, Noviembre 2024



# Resumen

---

La resolución temporal (TR) es una de las características más importantes para un detector. En el caso particular de un centellador, la captación de luz también es importante, depende del área sensible del fotosensor. Normalmente, el área sensible de los tubos fotomultiplicadores (PMT) es mayor que el área sensible de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM). Otras diferencias son el voltaje de operación, su tamaño y costo, en algunos casos, el gran tamaño de los PMT puede ser difícil de colocar, si se requiere poco espacio, en cuyo caso es preferible utilizar SiPM. El valor de TR también depende del tamaño y la geometría del centellador, del número de fotosensores y de la parte electrónica.

En este trabajo, se estudia tanto como simulación y experimentalmente, la distribución del tiempo medio de llegada de fotones ópticos (AT) a un SiPM. Se define la variación de AT como la resolución temporal intrínseca (ITR). En GEANT4, se simuló dos geometrías diferentes: cuadrada y hexagonal, para un centellador de plástico BC-404 con un área sensible que emuló el área sensible de un fotosensor llamado Scorer. Como fuente de radiación se simuló los decaimientos más probables de  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$  y  $\mu^-$  de 1 GeV. Se mostró que AT e ITR dependen de la geometría y el tamaño del centellador plástico, la ubicación del Scorer, la partícula incidente y su energía. Entonces, el ITR y por tanto el TR no es una constante para un detector. Finalmente, mostramos la relación entre AT y la energía depositada por la partícula incidente, que en el experimento se relacionan con el evento de tiempo de respuesta del detector y la carga depositada por la partícula incidente, respectivamente.



# Índice general

---

<b>Índice de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Hipótesis	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Específicos	2
1.3. Interacción radiación materia	3
1.3.1. Interacción de partículas pesadas cargadas con la materia	3
1.3.2. Interacción de electrones con la materia	4
1.3.3. Interacción de fotones con la materia	4
<b>2. Detectores de radiación ionizante</b>	<b>7</b>
2.0.1. Plástico centellador	7
2.0.2. Efecto de centelleo	8
2.0.2.1. Plástico centellador BC-404	9
2.0.3. Fotomultiplicadores de silicio (SiPM)	11
2.0.4. Parámetros de operación de un SiPM	14
<b>3. Detectores tipo forward</b>	<b>17</b>
3.0.1. Características de detectores de tipo forward	18
3.1. Ejemplos de detectores tipo forward	19
3.1.1. Experimento LHCb	19
3.1.2. Sistema detector forward ATLAS	19
3.1.3. Sistema V0 ALICE	20
3.2. Proyecto NICA	22
3.2.1. Detector multipropósito (MPD)	24
3.2.2. Detector Be-Be	25
<b>4. Metodología</b>	<b>29</b>
4.1. Simulación Monte Carlo	29
4.1.1. Características del plástico centellador	30
4.1.2. Parámetros ópticos de celda	32

## ÍNDICE GENERAL

---

4.2. Simulaciones de celda . . . . .	32
4.2.1. Caracterización de celda . . . . .	32
4.2.2. Simulación resolución temporal intrínseca . . . . .	33
4.2.3. Fuentes de partículas simuladas . . . . .	33
4.2.4. Análisis de simulación resolución temporal intrínseca . . . . .	34
4.3. Configuración experimental . . . . .	35
4.3.1. Caracterización de celda hexagonal . . . . .	35
4.3.2. Determinación de resolución temporal . . . . .	37
4.3.3. Análisis de experimento . . . . .	38
<b>5. Resultados</b>	<b>41</b>
5.1. Simulación . . . . .	41
5.1.1. Resolución temporal intrínseca . . . . .	43
5.1.2. Eficiencia . . . . .	49
5.2. Resultados Experimentales . . . . .	51
5.2.1. Caracterización de voltaje óptimo . . . . .	51
5.2.2. Resultados para ITR . . . . .	53
5.2.3. Eficiencia . . . . .	57
5.3. Primer anillo de BeBe . . . . .	57
<b>6. Conclusiones</b>	<b>61</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Predominación de efectos de interacción de fotones con la materia . . . . .	5
1.2. Poder de penetración de los diferentes tipos de radiación . . . . .	5
2.1. Ejemplo de diferentes geometrías para los plásticos centelladores . . . . .	8
2.2. Niveles energéticos en una molécula de centellador orgánico . . . . .	9
2.3. Características generales de los plásticos centelladores fabricados por Saint Gobain . . . . .	10
2.4. Espectro de emisión del plástico centellador BC-404 . . . . .	11
2.5. Ejemplo de SiPM . . . . .	12
2.6. Las celdas de un SiPM son fotodiodos polarizados al revés y conectados en paralelo entre sí . . . . .	12
2.7. Cuando se polariza inversamente el SiPM, es posible alcanzar un rango de voltaje cerca de $V_{bd}$ en el que una pequeña variación produce un gran cambio en la corriente . . . . .	13
2.8. Gráfica de corriente oscura vs voltaje para sensores de 3 mm con microceldas de 20 $\mu\text{m}$ , 35 $\mu\text{m}$ y 50 $\mu\text{m}$ . . . . .	14
2.9. Voltaje de ruptura . . . . .	15
2.10. Tasa de conteo oscuro (DCR) en función de la sobretensión para un SiPM con micro celdas de 35 $\mu\text{m}$ . . . . .	16
3.1. Esquema de los detectores de LHCb . . . . .	19
3.2. Los detectores forward ATLAS y su posición relativa al punto de interacción . . . . .	20
3.3. Posición de los dos detectores VZERO, dentro del diseño general del experimento ALICE . . . . .	22
3.4. Complejo NICA y sus respectivos experimentos . . . . .	23
3.5. Detector MPD y los detectores que lo conforman . . . . .	25
3.6. Uno de los hodoscopios de la geometría de diseño BE–BE tal como se muestra en el entorno offline de MPD. Consta de 162 celdas hexagonales . . . . .	26
3.7. Prototipo de celda BE–BE individual. La celda hexagonal BC-404 tiene 5 cm de alto y 2 cm de ancho. Para el SiPM, el área sensible es de (6 mm) <sup>2</sup> mientras que para el PMT es el área de un círculo de 1 pulgada de diámetro . . . . .	27

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.1. Simulación del espectro de emisión para el plástico centellador BC-404 .	31
4.2. Ilustración de las tres configuraciones. a) vista frontal y b) vista lateral. El cuadrado y el hexágono representan el centellador de plástico BC-404, el cuadrado sólido representa el anotador y el círculo sólido representa el punto de interacción . . . . .	34
4.3. Celda con SiPM acoplado a una de las caras del perímetro . . . . .	36
4.4. Configuración experimental . . . . .	37
4.5. Diagrama de conexión para la configuración experimental . . . . .	38
4.6. Ajuste de datos para resolución temporal intrínseca para el hexágono 2 .	39
5.1. Distribuciones de fotones ópticos . . . . .	42
5.2. Distribución de tiempos de llegada de los fotones ópticos dependiendo del lugar de interacción . . . . .	42
5.3. a)Energía depositada por $^{90}\text{Sr}$ , b)Tiempo de llegada de fotones ópticos para un evento . . . . .	44
5.4. Ajuste Landau para los tiempos de llegada . . . . .	45
5.5. Distribución de los tiempos de llegada medio de los fotones ópticos para todos los eventos de $\text{Sr}^{90}$ . . . . .	45
5.6. Resolución temporal para los fotones ópticos a) todos los eventos, b) los eventos con energía depositada mayor a 0.45 MeV . . . . .	46
5.7. Resolución temporal intrínseca vs la energía depositada para la fuente $^{90}\text{Sr}$	46
5.8. Comparación de resolución temporal intrínseca para todas las configuraciones . . . . .	47
5.9. Comparación de los tiempos de llegada de los fotones ópticos para todas las configuraciones . . . . .	47
5.10. Distribución óptica de los fotones ópticos con tiempo de llegada medio para la fuente $\text{Sr}90$ para el Scorer ubicado en el centro (línea azul) y en la parte superior (línea magenta) . . . . .	48
5.11. La profundidad alcanzada por el $e^-$ emitido por $\text{Sr}^{90}$ a) penetración del electrón en primera y segunda configuración, b) penetración del electrón para la configuración cuadrada . . . . .	49
5.12. Distribución de fotones ópticos de tiempo de llegada producidos por $\mu^-$ que interactúan en primera configuración . . . . .	50
5.13. Comparación de la eficiencia . . . . .	51
5.14. Relación entre el tiempo medio de llegada y la energía depositada para la configuración cuadrada (izquierda) y la primera configuración (derecha) para las fuentes $\text{Co}^{60}$ (fila superior), $\text{Sr}^{90}$ (fila central) y $\mu^-$ (fila inferior)	52
5.15. Gráfica de voltaje vs amplitud de las celdas . . . . .	53
5.16. Gráfica de Voltaje vs tasa de eventos . . . . .	54
5.17. Comparación de resolución temporal intrínseca para todas las celdas . .	54
5.18. Distribución de tiempo vs carga depositada de todos los eventos . . . .	55
5.19. Ajuste gaussiano para mejorar la resolución temporal intrínseca . . . . .	56
5.20. Comparación de la mejora de la resolución temporal intrínseca para las celdas . . . . .	56

5.21. Comparación de eficiencia para todas las celdas . . . . .	57
5.22. Comparación de medidas para el primer anillo de BeBe . . . . .	58
5.23. Estructura de BeBe con celdas y electrónica . . . . .	59



---

## Capítulo 1

# Introducción

---

Las partículas radioactivas o radiación ionizante solo pueden ser detectadas a través de sus interacciones con la materia. Existen interacciones específicas para las partículas cargadas que difieren de las partículas neutras como los fotones. Se podría decir que cada proceso de interacción puede servir como base para el diseño de un detector. La diversidad de estos procesos ha sido estudiada a fondo y como efecto, existe una gran cantidad de dispositivos para la detección de radiación ionizante. Además, para una misma partícula pueden ser importantes diferentes procesos de interacción dependiendo la energía.

Los detectores de partículas, también conocido como detector de radiación, son instrumentos diseñados para detectar, seguir y/o identificar partículas ionizantes. Estos detectores pueden medir la energía de las partículas y otros parámetros como el momento, el espín, la carga, la identificación de tipo de partícula, además de registrar simplemente su presencia.

Estos detectores de partículas se emplean principalmente en experimentos de colisionadores y rayos cósmicos para investigar las propiedades fundamentales de la materia. Específicamente, los detectores de estado sólido, que utilizan plásticos centelladores y están optimizados para el desarrollo de sistemas de activación con polarización mínima.

Las características de los detectores pueden variar dependiendo de la aplicación para la que fue desarrollado. Dentro de las características que tienen estos instrumentos son: sensibilidad, respuesta de detección, resolución energética eficiencia de detección y resolución temporal. Esta última es la característica mas relevante para este trabajo, ya que es una valor crucial que se busca optimizar, ya que determina la unidad mínima de tiempo en la que el detector puede diferenciar entre dos eventos físicos consecutivos relevantes. La resolución temporal depende del tipo y geometría del detector y la técnica de adquisición de datos empleada, la cual esta vinculada con los instrumentos utilizados.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un monitor de haz capaz de discrimi-

nar eventos, el cual debe contar con una resolución temporal de alrededor de los 100 ps, basándose en un plástico centellador BC-404 y un fotosensor que se encargara de recolectar la luz emitida por el plástico, los datos se adquieren con instrumentos de la marca CAEN. Luego, realizar el análisis de datos adquiridos y comparar los resultados con trabajos previos.

### 1.1. Hipótesis

Cada celda del monitor de haz Be-Be es capaz de tener una resolución temporal de alrededor de 100 ps.

### 1.2. Objetivos

#### 1.2.1. General

Simular una geometría de celdas del detector BE-BE por medio del software de interacción de radiación y análisis (GEANT4), para el plástico centellador BC-404 y obtener una resolución temporal intrínseca, y caracterizar cada una de las celdas experimentalmente y comparar los resultados con la simulación.

#### 1.2.2. Específicos

- Simular arreglo de hexágonos para analizar cada celda del detector en GEANT4, con distintos tipos de partículas y en función del ángulo del haz.
- Estudio de dos diferentes geometrías para comparar el funcionamiento del detector.
- Análisis de los parámetros obtenidos en la simulación.
- Determinación de los parámetros adecuados para llevar a cabo el detector.
- Caracterización de fotosensores de silicio (SiPM) y centellador plástico.
- Caracterización de un prototipo de una celda del detector.
- Caracterización bajo condiciones de radiación.

### 1.3. Interacción radiación materia

Se entiende comúnmente que los fenómenos asociados con la interacción de la radiación en la materia incluyen una amplia variedad de efectos físicos. Además, la naturaleza de las interacciones en la materia depende del tipo de radiación y energía entrante.

La radiación se comprende en términos de partículas cargadas en movimiento, que poseen suficiente energía para ionizar el material a su paso. Las fuentes de radiación pueden clasificarse en naturales y artificiales. Como ejemplo de radiación natural están los rayos cósmicos y la radioactividad ambiental, como la de  $^{40}\text{K}$  y  $^{222}\text{Rn}$ . Entre las fuentes artificiales se encuentran los aceleradores de partículas, los aceleradores utilizados en la medicina y los reactores nucleares. Estas partículas pueden interactuar con los electrones y núcleos atómicos a través de colisiones elásticas (donde cambian de trayectoria pero mantienen su energía cinética) e inelásticas (donde se modifica ligeramente su trayectoria y pierden energía cinética). Estas interacciones resultan en una pérdida de energía que se transforma en excitación e ionización, además de causar absorción o atenuación en el material.

Además, la radiación entrante puede causar daños permanentes o temporal. En la mayoría de los casos, estos daños no impiden que los detectores funcionen con normalidad, pero en situaciones de cantidades grandes de radiación o acumulación de altas frecuencias, los efectos de la radiación pueden degradar el rendimiento de los dispositivos.

En general cuando un haz de partículas cargadas interactúan con la materia, tienen lugar una serie de procesos que atenúan el haz incidente al ser absorbida en parte por dicha materia. En particular tenemos interés de dos tipos de partículas en su interacción con la materia:

#### 1.3.1. Interacción de partículas pesadas cargadas con la materia

Dado que los átomos están formados por núcleos muy pequeños rodeados de electrones, una partícula cargada al viajar a través de la materia se encuentra principalmente con electrones. La masa de una partícula alfa es 7294 veces mayor que la masa de un electrón, puede transferirle energía y momento, ya sea expulsándolo del átomo o elevándolo a un nivel de energía superior. Sin embargo, debido a la gran diferencia de masa entre la partícula alfa y el electrón, la energía y el momento perdidos son relativamente pequeños, permitiendo que la partícula alfa continúe en su trayectoria original. Tras numerosas interacciones de este tipo, cuando la partícula alfa ha perdido la mayor parte de su energía, es posible que interactúe con un núcleo. En este caso, al tratarse de una interacción entre partículas de masa comparable, la partícula alfa puede experimentar una gran transferencia de impulso y cambiar de dirección.

### 1.3.2. Interacción de electrones con la materia

Las partículas beta, tanto electrones como positrones, también pierden energía principalmente a través de interacciones con electrones atómicos. Estas interacciones pueden expulsar a los electrones atómicos del átomo o elevarlos a un nivel de energía mas alto. Dado que las partículas beta y los electrones atómicos tienen la misma masa, lo que significa que una gran fracción de la energía y el momento se puede perder en una colisión, lo que hace que la partícula beta sufra un gran angulo de dispersión. Además, las partículas beta se mueven mucho mas rápido que las partículas pesadas cargadas y recorren distancias mucho mayores entre colisiones. Por lo tanto, el alcance de las partículas beta es significativamente mayor que el de las partículas pesadas cargadas.

### 1.3.3. Interacción de fotones con la materia

Los fotones interactúan con la materia a través de diversos mecanismos, que pueden clasificarse según el tipo de objetivo y el efecto de la interacción sobre el fotón (absorción o dispersión). En energías mas allá del rango ultravioleta, los procesos predominantes son la absorción fotoeléctrica, la dispersión Compton y la producción de pares. como se muestra en la figura 1.1 La absorción o efecto fotoeléctrico es la mayor contribuyente a la sección transversal total a bajas energías de fotones, la producción de pares es la interacción mas común a altas energías y la dispersión Compton prevalece en el rango de energía intermedia.

Debido a las propiedades físicas, los neutrones pueden atravesar una mayor cantidad de materia sin ser detectados por los detectores convencionales. Los neutrones son las partículas mas penetrantes que la radiación alfa y beta, y en algunos casos, incluso pueden superar la penetración de la radiación gamma, como vemos en la figura 1.2 [1].

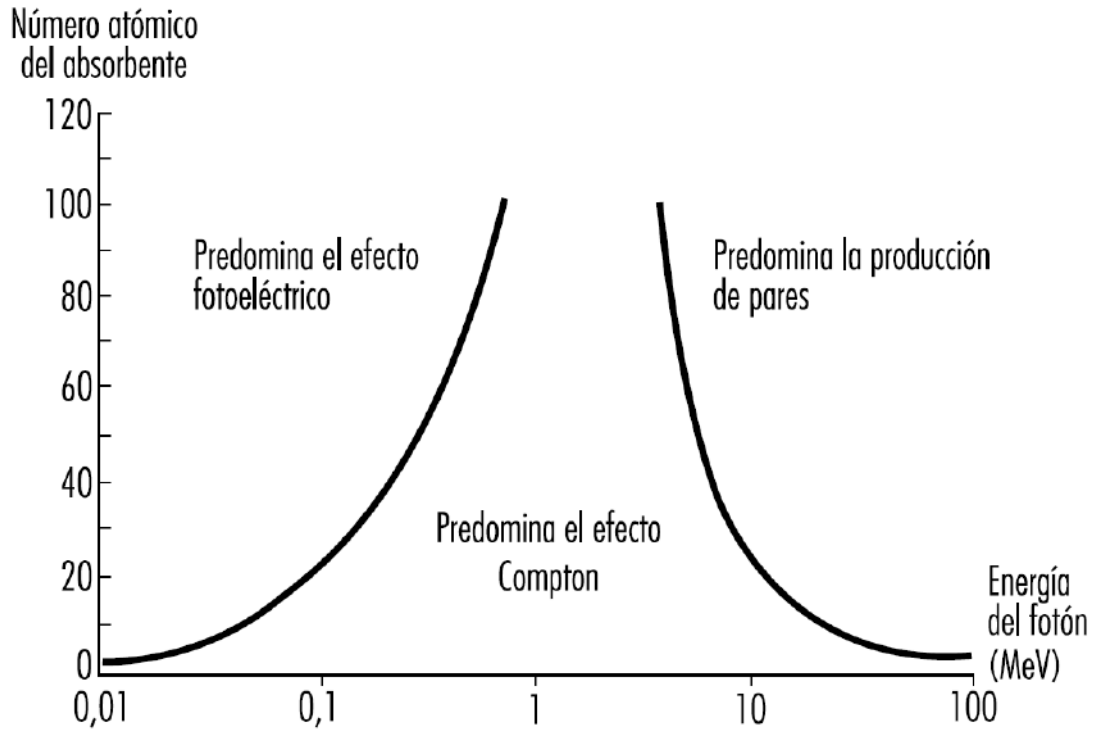


Figura 1.1: Predominación de efectos de interacción de fotones con la materia

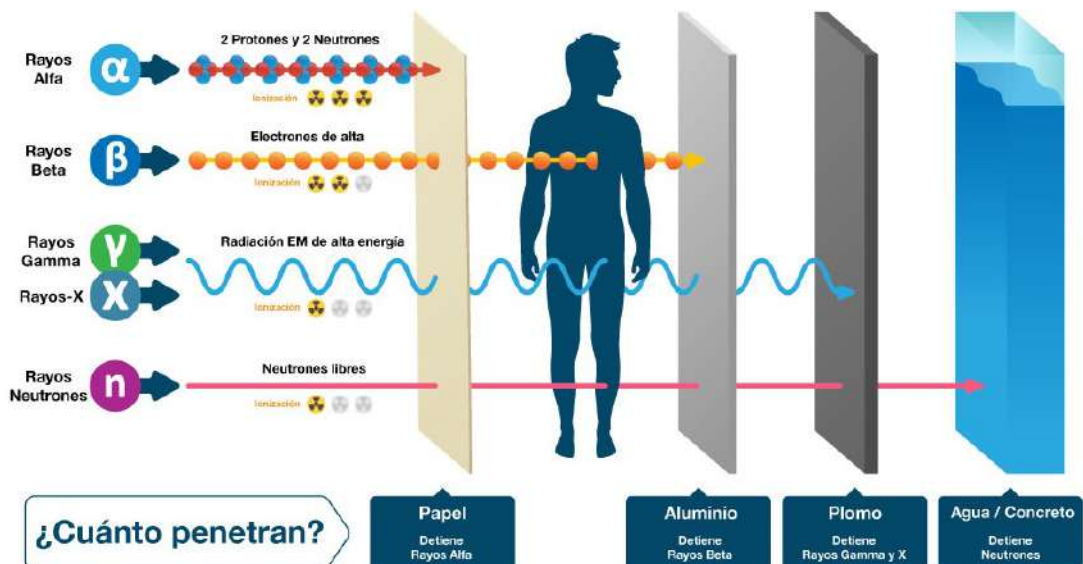


Figura 1.2: Poder de penetración de los diferentes tipos de radiación



---

## Capítulo 2

# Detectores de radiación ionizante

---

La detección de la radiación ionizante se basa en la evaluación de los efectos físico-químicos que provocan las radiaciones ionizantes al interactuar con la materia. Las radiaciones depositan energía en los materiales, principalmente a través de la ionización (gases o semiconductores) y excitación (sólidos y líquidos) de sus átomos, pero además pueden producirse otros efectos como la emisión de luz (luminiscencia), un cambio de temperatura (calorímetro) o bien otros efectos químicos, todos ellos indicadores de la presencia de radiación.

Los detectores de radiación aprovechan las interacciones con la materia descritas arriba para generar un efecto medible que indica la presencia de radioactividad. En general, estos instrumentos se pueden caracterizar por tres aspectos: el absorbente de radiación (los materiales que conforman al dispositivo), una observable que indique la interacción con la radiación y un método para medir la señal.

### 2.0.1. Plástico centellador

El plástico centellador es un material que absorbe grandes fracciones de la energía transportada por radiación incidente en el material, transformándola en fotones detectable (fotones ópticos, o sea, luz visible o casi visible), los cuales luego se convierten en una señal eléctrica. En la figura 2.1 [2] se pueden observar un ejemplo de plásticos centelladores.

Los plásticos centelladores corresponden a la categoría más extendida de centelladores utilizados en física nuclear y de altas energías. Estos constan de una matriz polimérica (un plástico base) con un material centellador disuelto. En su proceso de fabricación, el material centellador primario se disuelve en el solvente precursor para luego polimerizar la solución, dando lugar al plástico con el centellador disperso en forma homogénea. Los plásticos base más utilizados son el poliestireno (plástico del que están hechos, por ejemplo, las cajas de CDs, los cubiertos plásticos y los vasos

## 2. DETECTORES DE RADIACIÓN IONIZANTE

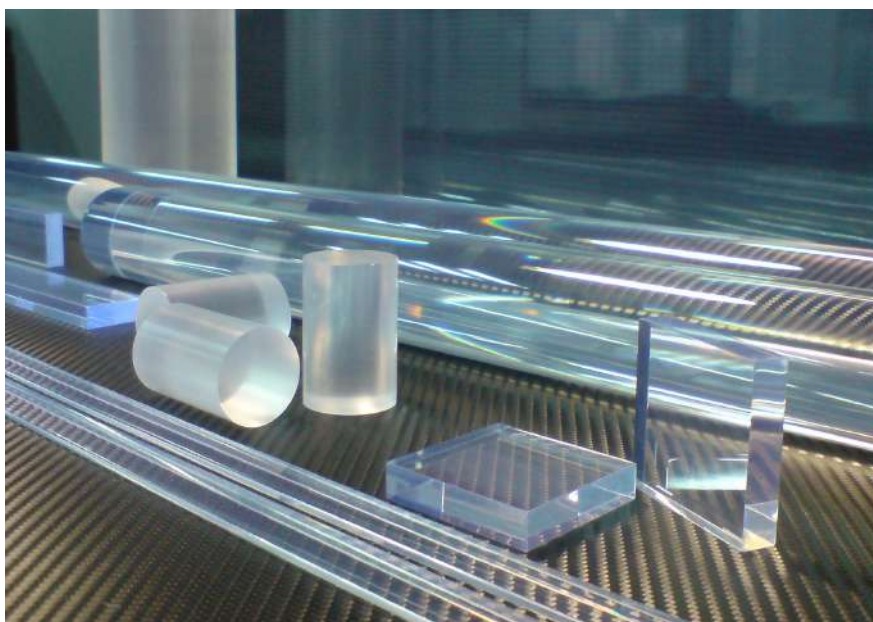
---

desechables), el polimetilmetacrilato (más conocido como acrílico) y poliviniltolueno.

Hay dos tipos de emisión de luz: fluorescencia y fosforescencia. La fluorescencia se caracteriza por la emisión rápida de luz ( $ns \rightarrow \mu s$ ) en el rango de longitud de onda visible y es independiente de la temperatura. La fosforescencia, en cambio, corresponde a la emisión de luz durante un período más prolongado ( $\mu s \rightarrow ms$ , e incluso horas, dependiendo del material), con longitudes de onda más largas que la fluorescencia y depende de la temperatura. En la práctica, solo la fluorescencia, con su rápida emisión de luz, es útil para la detección de radiación.

Hay varios parámetros que caracterizan a los centelladores. La eficiencia de centelleo es una de ellas,  $R_s$ , es la relación entre la media de número de fotones emitidos  $\langle N_{ph} \rangle$  y la energía  $E_i$  de la radiación incidente absorbida por el centellador.

$$R_s = \frac{\langle N_{ph} \rangle}{E_i} \quad (2.1)$$

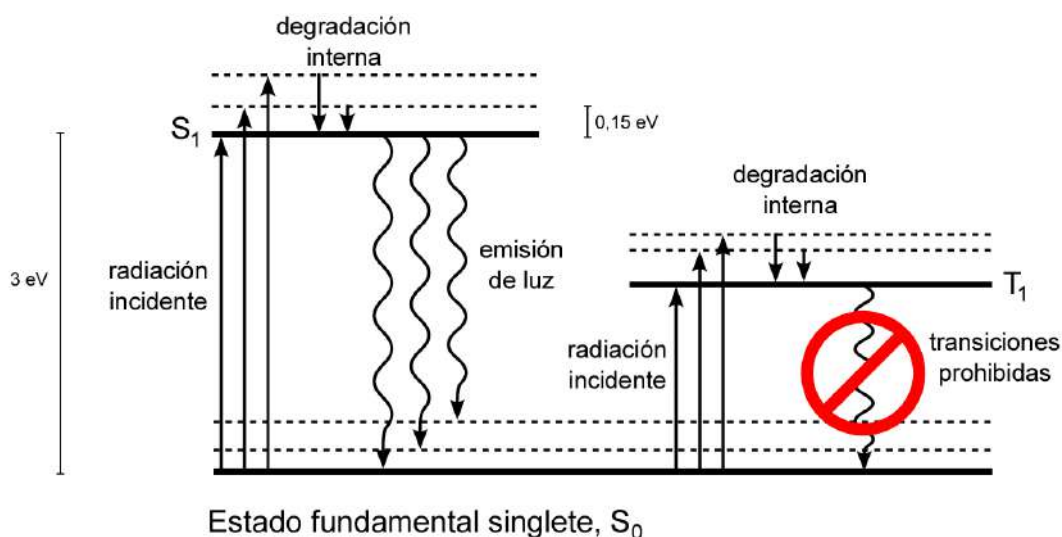


**Figura 2.1:** Ejemplo de diferentes geometrías para los plásticos centelladores

### 2.0.2. Efecto de centelleo

Los compuestos aromáticos poseen los llamados orbitales moleculares  $\pi$ , en los cuales los electrones no se encuentran asociados a un átomo en particular, sino que están

deslocalizados en la molécula. Estos orbitales son los que generan los enlaces químicos entre los átomos de carbono que forman el anillo característico de estos compuestos. La luz de centelleo se genera por transiciones entre niveles energéticos de electrones de valencia. En la figura 2.2 se puede ver un diagrama de energías esquemático, donde hemos graficado el estado fundamental, un estado excitado singlete de spin  $S_1$  y otro triplete  $T_1$ . El fundamental es un estado singlete y lo notamos  $S_0$ . Además, asociado a cada nivel electrónico hay una estructura de subniveles energéticos de excitaciones de modos vibracionales moleculares. La diferencia de energía entre niveles electrónicos está en el orden de los 3 eV, mientras que entre los subniveles vibracionales, en el orden de los 0.15 eV.



**Figura 2.2:** Niveles energéticos en una molécula de centellador orgánico

### 2.0.2.1. Plástico centellador BC-404

Todos los plásticos disponibles en proveedores comerciales se preparan de la misma manera, que es la polimerización radical iniciada térmicamente. Se utilizan dos polímeros aromáticos diferentes: poliviniltolueno o poliestireno. Mientras que el primero lo utilizan actualmente grandes empresas como Eljen Technology o Saint-Gobain Crystals and Detectors, el segundo es la elección de IHEP, Nuvia CZ y Amcrys.

## 2. DETECTORES DE RADIACIÓN IONIZANTE

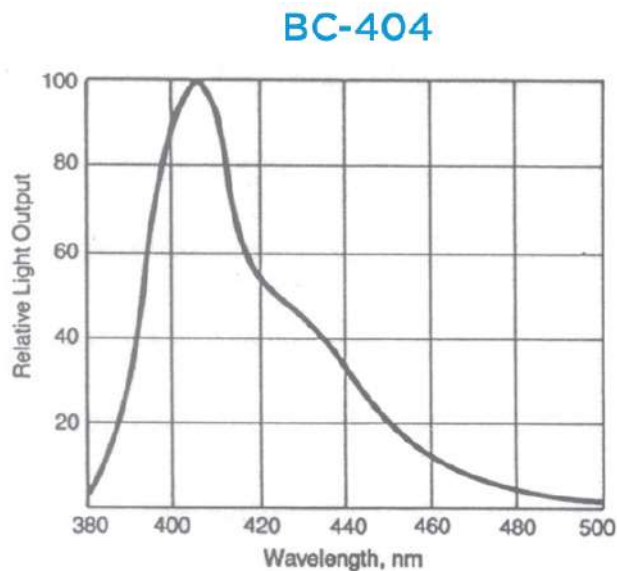
	<b>BC-400</b>	<b>BC-404</b>	<b>BC-408</b>	<b>BC-412</b>	<b>BC-416</b>
<b>Radiation Detected</b>					
<100keV X-rays			X		
100keV to 5MeV gamma rays				X	
>5MeV gamma rays	X				
Fast neutrons				X	X
Alphas, betas	X	X	X		
Charged particles, cosmic rays, muons, protons, etc.			X	X	X
Principal Uses/Applications	general purpose	fast counting	TOF large area	large area	large area economy
<b>Scintillation Properties</b>					
Light Output, %Anthracene	65	68	64	60	38
Rise Time, ns	0.9	0.7	0.9	1.0	-
Decay Time (ns)	2.4	1.8	2.1	3.3	4.0
Pulse Width, FWHM, ns	2.7	2.2	~2.5	4.2	5.3
Wavelength of Max. Emission, nm	423	408	425	434	434
Light Attenuation Length, cm*	160	140	210	210	210
Bulk Light Attenuation Length, cm	250	160	380	400	400
<b>Atomic Composition</b>					
No. H Atoms per cc ( $\times 10^{22}$ )	5.23	5.21	5.23	5.23	5.25
No. C Atoms per cc ( $\times 10^{22}$ )	4.74	4.74	4.74	4.74	4.73
Ratio H:C Atoms	1.103	1.100	1.104	1.104	1.110
No. of Electrons per cc ( $\times 10^{23}$ )	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37

\*The typical 1/e attenuation length of a 1x20x200cm cast sheet with edges polished as measured with a bialkali photomultiplier tube coupled to one end.

**Figura 2.3:** Características generales de los plásticos centelladores fabricados por Saint Gobain

El material centellador seleccionado para este trabajo es el Bicron 404 (BC-404), el cual se utiliza principalmente para la detección de partículas alfa y beta, también se puede utilizar en aplicaciones de conteo rápido, en la figura 2.3 vemos algunas de las características que tiene este plástico comparada con otros modelos y en la figura 2.4 se observa su espectro de emisión de acuerdo a su hoja técnica [3]. El BC-404 fue elegido por la propiedad que da el fabricante de un tiempo de subida aproximado de 0.7 ns.

El espectro de centelleo debe adaptarse a la sensibilidad espectral del dispositivo fotosensible acoplado al centellador. La longitud de onda correspondiente a la emisión máxima de luz debe estar dentro del rango de sensibilidad espectral del fotocátodo del fotomultiplicador (dispositivo fotosensible).



**Figura 2.4:** Espectro de emisión del plástico centellador BC-404

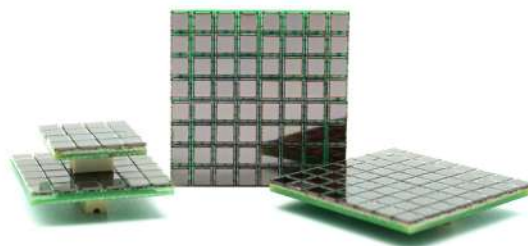
### 2.0.3. Fotomultiplicadores de silicio (SiPM)

Los fotomultiplicadores de silicio (SiPM) son dispositivos de detección de fotones relativamente nuevos, cuyo desarrollo comenzó en 1993. El fotomultiplicador de silicio (SiPM), es un fotodetector de estado sólido formado por una serie de cientos o miles de diodos de avalancha de fotón único integrados (SPAD), llamados microcélulas o píxeles, en la figura 2.5 se ve un ejemplo de SiPM. En los SiPM analógicos, todas las celdas son independientes y están conectadas a una salida común en paralelo y cada celda tiene su propia resistencia como se ve en la figura 2.6. Cada celda suele ser cuadrada con una longitud de alrededor de las  $10\ \mu\text{m}$  y  $100\ \mu\text{m}$ . Tras la detección de un fotón, el SPAD genera una gran señal de salida eléctrica debido a la multiplicación de la avalancha interna. En un SiPM es posible contar cada SPAD disparado por separado: (i) de forma digital (SiPM digital), donde cada SPAD está conectado a su propia electrónica de lectura o (ii) por la amplitud (o carga) de la suma de las señales SPAD individuales como en un SiPM analógico. De cualquier manera, el SiPM permite detectar y contar fotones con alta resolución. La amplificación de avalancha interna también es lo suficientemente rápida como para obtener muy buena información a cerca del tiempo de llegada de los fotones detectados, en varias decenas de picosegundos.

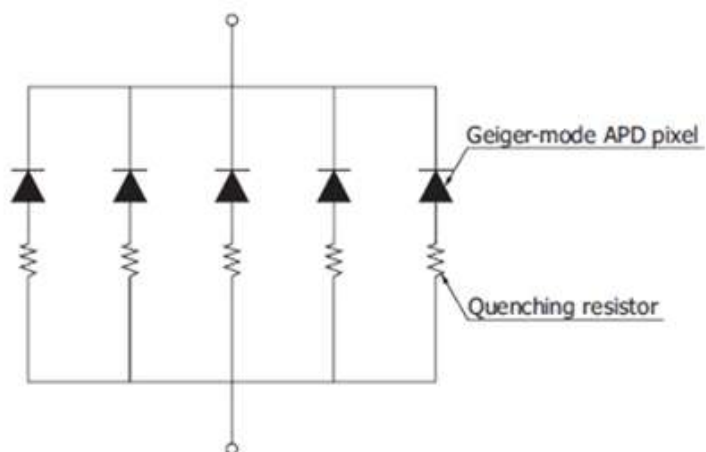
Estas propiedades, junto con ventajas como el bajo voltaje de operación, tamaño y robustez, hacen del SiPM un excelente dispositivo para la detección de luz desde un solo

## 2. DETECTORES DE RADIACIÓN IONIZANTE

---



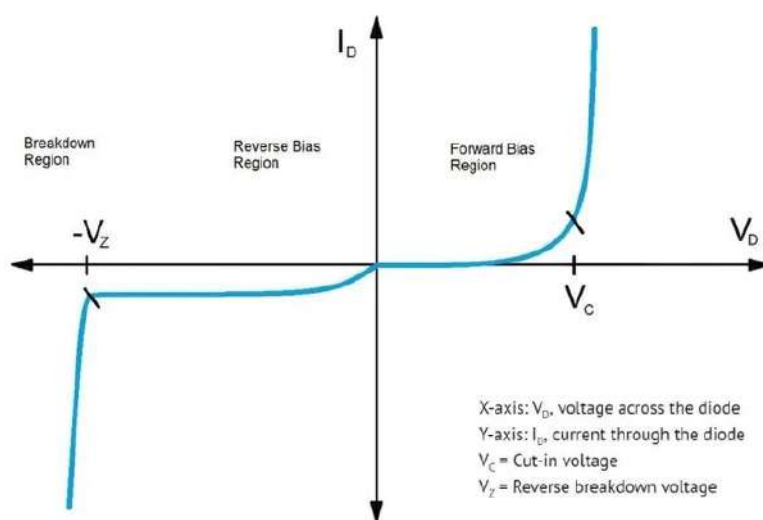
**Figura 2.5:** Ejemplo de SiPM



**Figura 2.6:** Las celdas de un SiPM son fotodiodos polarizados al revés y conectados en paralelo entre sí

fotón hasta varios miles de ellos, especialmente cuando se requiere una sincronización más rápida. Las aplicaciones típicas basadas en baja intensidad de luz son la detección y alcance de la luz. Acoplados a centelleadores orgánicos o inorgánicos, los SiPM detectan la luz de centelleo con la mayor precisión temporal. Los SiPM comparados con los tubos fotomultiplicadores PMT, son mejores gracias a su tamaño e insensibilidad a los campos magnéticos. Además, al igual que los diodos, los SiPM tienen una característica intrínseca llamada tensión de ruptura ( $V_{bd}$ ), que se define como la tensión a la que el diodo con polarización inversa comienza a conducir. Al SiPM se le aplica un voltaje de polarización ( $V_b$ ), necesariamente mayor que  $V_{bd}$  para que exista conducción. Tras aplicar un  $V_b$  superior a  $V_{bd}$  en el SiPM, aparece un campo eléctrico que acelera los portadores de cargas libres.

Como se muestra en la figura 2.6, una resistencia por la que fluye la corriente cuando hay una cascada de electrones producida por la llegada de un fotón suele colocarse en serie con el SiPM. Esta resistencia produce una caída de voltaje sobre el SiPM, que disminuye por debajo del voltaje de ruptura y deja de conducir.



**Figura 2.7:** Cuando se polariza inversamente el SiPM, es posible alcanzar un rango de voltaje cerca de  $V_{bd}$  en el que una pequeña variación produce un gran cambio en la corriente

En la figura 2.7 [4] se pueden observar algunas de las características mencionadas, y entre ellas, la gran variación de la corriente se produce con una pequeña variación de la tensión una vez superado el  $V_{bd}$ . A diferencia de los diodos comunes, los SiPM están optimizados para funcionar en este rango de voltajes que implican grandes variaciones en las corrientes.

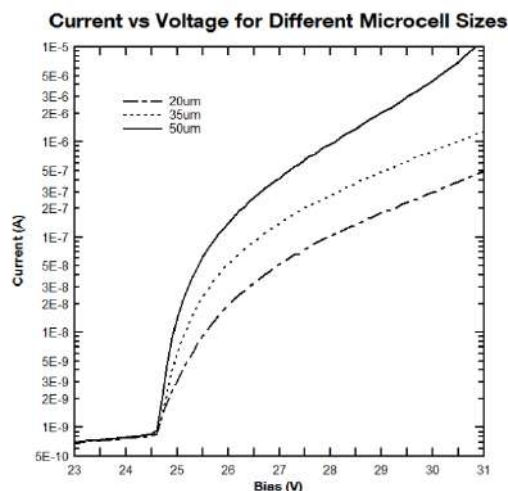
### 2.0.4. Parámetros de operación de un SiPM

Los usuarios de los SiPM generalmente necesitan comprender los siguientes parámetros: voltaje de ruptura y sobrevoltaje, ganancia, factor de llenado, eficiencia de detección de fotones (PDE), tasa de conteo oscuro (DCR), interferencia óptica, post pulso y dependencia de la temperatura.

- Voltaje de ruptura y sobrevoltaje

El voltaje de ruptura ( $V_{bd}$ ) es el punto de cambio en el que la intensidad del campo eléctrico generado en la región de agotamiento es suficiente para crear una descarga Geiger. El punto  $V_{bd}$  se identifica claramente en una grafica de corriente vs voltaje por el aumento repentino de la corriente, como en la figura 2.8 [5].

Los SiPM operan en un punto de cambio que típicamente es de 10 % - 25 % mas alto que el  $V_{bd}$  como se ve en la figura 2.9 [5]. La diferencia entre el  $V_{bd}$  y el punto de cambio se conoce como sobretensión ( $\Delta V$ ). Tanto el  $V_{bd}$  como el rango  $\Delta V$  recomendado se dan en las hojas de datos de los productos del SiPM. Estos valores permiten al usuario calcular el V bias para aplicar.

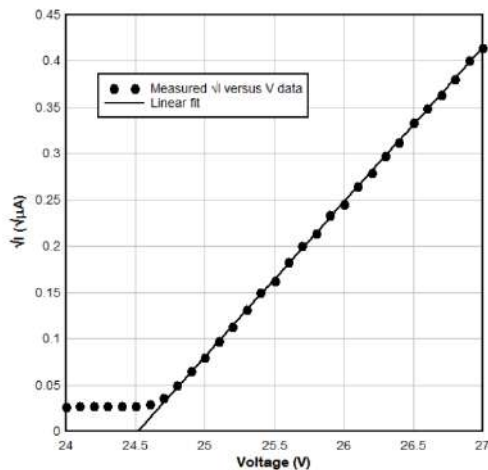


**Figura 2.8:** Gráfica de corriente oscura vs voltaje para sensores de 3 mm con microceldas de 20  $\mu\text{m}$ , 35  $\mu\text{m}$  y 50  $\mu\text{m}$

- Ganancia

La ganancia de un sensor SiPM se define como la cantidad de carga creada para cada fotón detectado, y es una función de sobrevoltaje y tamaño de micro celda. Cada micro

**Breakdown Voltage Derived from Measured IV Data**  
MicroFC-30035



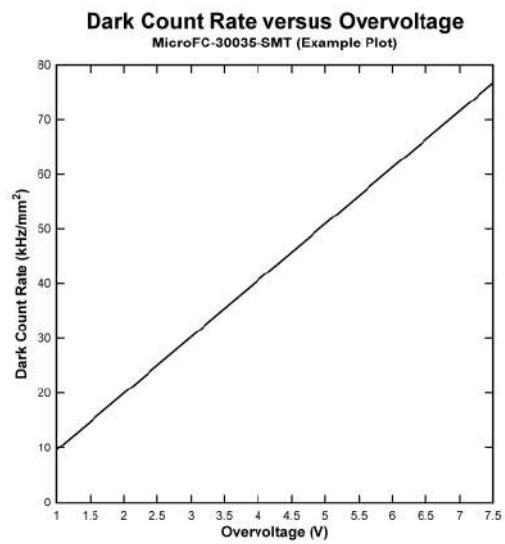
**Figura 2.9:** Voltaje de ruptura

celda en el SiPM genera una cantidad de carga altamente uniforme y cuantificada cada vez que se genera una avalancha mediante un fotón absorbido en el volumen activo. La ganancia de la microcelda (y por lo tanto del sensor) se define como la relación de la carga de una micro celda activada a la carga de un electrón. La ganancia se puede calcular a partir de la sobretensión de  $V$ , la capacitancia de la micro celda  $C$  y la carga del electro  $q$ , la ganancia  $G$  se puede calcular por

$$G = \frac{C \times \Delta V}{q}. \quad (2.2)$$

- Tasa de cuentas oscuras

La principal fuente de ruido en un SiPM es la tasa de conteo oscura (DCR), que se debe principalmente a electrones térmicos generados en el volumen activo. El DCR es una función de área activa, sobretensión y temperatura como se ve en la figura 2.10 [5]. Cada recuento oscuro es el resultado de un electrón generado térmicamente que inicia una avalancha en la región activa. Las señales resultantes de la descomposición de la micro celda, debido a electrones generados por fotones o térmicamente, son idénticos. Por lo tanto, los electrones generados térmicamente forman una fuente de ruido e el nivel de fotón único. Si se puede establecer un umbral por encima del nivel de fotón único, los desencadenantes falsos del ruido pueden reducirse significativamente. Sin embargo, los recuentos oscuros contribuirán a la señal medida.



**Figura 2.10:** Tasa de conteo oscuro (DCR) en función de la sobretensión para un SiPM con micro celdas de  $35 \mu\text{m}$

---

## Capítulo 3

# Detectores tipo forward

---

La investigación y el desarrollo de la ciencia de los aceleradores han sido muy activos durante más de 100 años. Los aceleradores de partículas de alta energía han proporcionado muchos descubrimientos científicos en el siglo XX y seguirán preparando descubrimientos científicos en el siglo XXI. La confirmación del descubrimiento de la partícula de Dios o del bosón de Higgs el 4 de julio de 2012 es un claro ejemplo. Estos descubrimientos llevaron a esfuerzos internacionales para el diseño y construcción de fábricas de Higgs y un colisionador de hadrones muy grande (VLHC). La investigación y el desarrollo de aceleradores seguirán impulsando las innovaciones en el siglo XXI.

Los aceleradores de partículas producen y aceleran haces de partículas cargadas, como electrones, protones e iones, de tamaño atómico y subatómico. Se utilizan no sólo en investigaciones fundamentales para una mejor comprensión de la materia, sino también en una gran cantidad de aplicaciones socioeconómicas relacionadas con la salud, el monitoreo ambiental, la calidad de los alimentos y las tecnologías energéticas y aeroespaciales, entre otros campos. Los aceleradores de partículas pueden ser lineales (rectos) o de forma circular y tienen muchos tamaños diferentes. Pueden tener decenas de kilómetros de largo o caber en una habitación pequeña, pero todos los aceleradores cuentan con cuatro componentes principales:

1. Una fuente que produce partículas cargadas.
2. Un dispositivo compuesto para agregar energía a las partículas y acelerarlas aplicando un campo eléctrico estático u oscilante.
3. Una secuencia de tubos metálicos en el vacío para permitir que las partículas se muevan libremente sin chocar con las moléculas de aire o el polvo, que pueden disipar el haz.
4. Un sistema de electroimanes para dirigir y enfocar las partículas del haz o cambiar sus trayectorias antes de ser bombardeadas contra una muestra objetivo.

En los aceleradores actuales utilizados para experimentos de física de partículas se requieren energías significativamente mayores. Las partículas que se aceleran deben

### 3. DETECTORES TIPO FORWARD

---

estar cargadas, tales como electrones, protones o iones pesados. En ciertos casos, especialmente en los colisionadores, también son necesarias las antipartículas. Partículas como los positrones, o antiprotones se pueden producir en interacciones de electrones o protones. Después de la identificación y selección del impulso, se transfieren al sistema acelerador.

Existen varios tipos de detectores que se utilizan para colisiones de grandes energías como los tipo barril que se encuentra en CMS [6] y los detectores tipo forward son un tipo específico de detectores utilizados en experimentos de física de altas energías, especialmente en colisionadores de partículas como el Gran Colisionador de Hadrones [7] (LHC, por sus siglas en inglés). Estos detectores están diseñados para detectar partículas que se producen en las colisiones y que se mueven en direcciones cercanas al eje del haz de partículas, es decir, en la región forward”.

#### 3.0.1. Características de detectores de tipo forward

**Centralidad:** El término centralidad originalmente se refiere a una clasificación de acuerdo al parámetro de impacto. Es común que en los experimentos actuales se refiera a una clasificación de las colisiones en términos de la multiplicidad, pues es la observable utilizada para estudiar la centralidad. En la literatura, algunos autores [8] le llaman centralidad-b a la determinada respecto al parámetro de impacto. La centralidad es una propiedad geométrica crucial para la interpretación de datos experimentales de colisiones entre núcleos. Una centralidad baja permite reducir el impacto de fluctuaciones en observables físicas estudiadas en estos experimentos [9].

**Multiplicidad:** La multiplicidad es la cantidad de partículas que se producen en una colisión, cuando dos núcleos colisionan, estos lo pueden hacer de distintas formas. Para describir que tanto interaccionan se define el parámetro de impacto, que es la distancia entre los centros de los núcleos.

**Pseudorapidez:** El momento es el producto de la masa por la velocidad,

$$p = m \cdot v = (p_x, p_y, p_z) \quad (3.1)$$

Para especificar las tres componentes del momento, en este caso se utiliza un sistema de coordenadas esféricas centrada en el punto de la colisión,  $p = (|p|, \theta, \varphi)$ , donde  $\theta$  es el ángulo polar y  $\varphi$  es el ángulo azimutal. Como los detectores tienen forma cilíndrica, en lugar del ángulo polar se utiliza la llanada pseudorapidez:

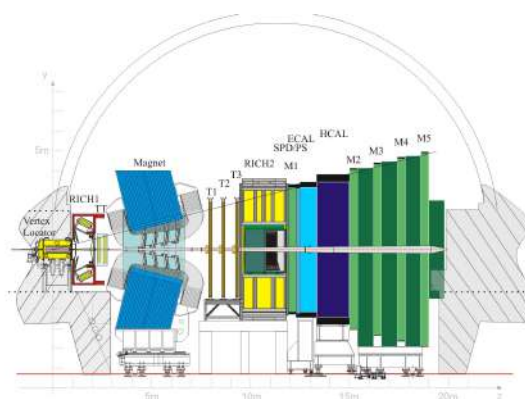
$$\eta = -\ln[\tan(\theta/2)] \quad (3.2)$$

## 3.1. Ejemplos de detectores tipo forward

### 3.1.1. Experimento LHCb

El detector LHCb está situado en uno de los cuatro puntos experimentales del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, donde chocan dos haces de protones (o iones) que viajan en direcciones opuestas. En estas colisiones se produce un gran conjunto de partículas diferentes que se pueden estudiar con el experimento LHCb. El punto experimental del LHCb es el punto más profundo del túnel del LHC, a unos 104 m, debido a la ligera inclinación del túnel.

El detector LHCb es un espectrómetro tipo forward del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. El experimento está diseñado para realizar mediciones precisas de la violación de CP y de las desintegraciones raras de hadrones de belleza y encanto. El excelente rendimiento del detector ha permitido a la colaboración LHCb publicar una amplia gama de resultados de física, demostrando el papel único de LHCb, tanto como experimento de sabor intenso como detector de propósito general en la región forward como se ve en la figura 3.1 [10].



**Figura 3.1:** Esquema de los detectores de LHCb

### 3.1.2. Sistema detector forward ATLAS

El experimento ATLAS del LHC está construyendo sistemas de detectores para cubrir la región forward. Se presenta el estado del experimento ATLAS y de sus detectores forward al inicio de la operación del LHC. Se analiza el programa de física avanzada de ATLAS que contribuirá a comprender las interacciones hadrónicas de alta energía y ayudará a determinar la composición primaria de los rayos cósmicos.

### 3. DETECTORES TIPO FORWARD

Se construyen tres sistemas dedicados para cubrir la región forward, como se muestra en la figura 3.2 con las posiciones relativas al punto de interacción (IP) [11]. Estos sistemas son el detector integrador de luminosidad Cerenkov, LUCID, el calorímetro de grado cero (ZDC) y los espectrómetros Roman Pot de ALFA. En la figura también se indican las futuras actualizaciones que se están estudiando actualmente; estos son los Roman Pot a 220 metros (RP220) y los detectores Forward Proton Tagging a 420 metros (FP420).

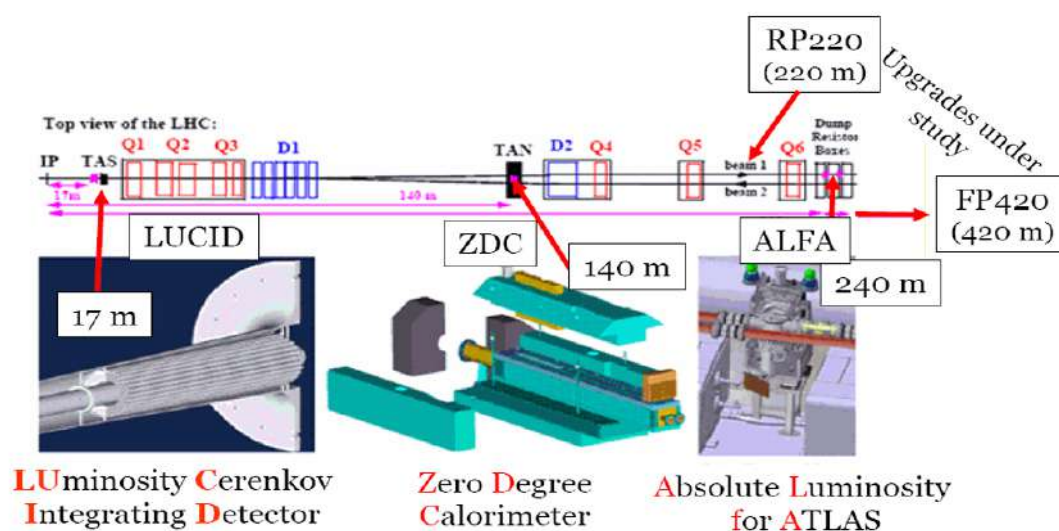


Figura 3.2: Los detectores forward ATLAS y su posición relativa al punto de interacción

#### 3.1.3. Sistema V0 ALICE

Un ejemplo del sistema mencionado anteriormente es el detector V0 ALICE-LHC, que se construyó utilizando plástico centelleante BC404 y BC408. Con este detector, la luz captada se transporta a fotomultiplicadores (PMT) mediante fibras ópticas. En las energías del LHC, este sistema ha servido muy bien durante los experimentos 1 y 2 como principal detector de centralidad para ALICE. Para el próximo LHC Run 3, con el esperado aumento de seis veces en la luminosidad Pb-Pb y una tasa de interacción de 50 kHz, ALICE utilizará un nuevo trigger de interacción rápida (FIT) [12]. FIT incluirá un gran anillo de plástico centelleante con fibras ópticas transparentes y PMT y dos conjuntos de radiadores de cuarzo acoplados a sensores MCP que proporcionan una resolución temporal para colisiones Pb-Pb de 30 ps o menos.

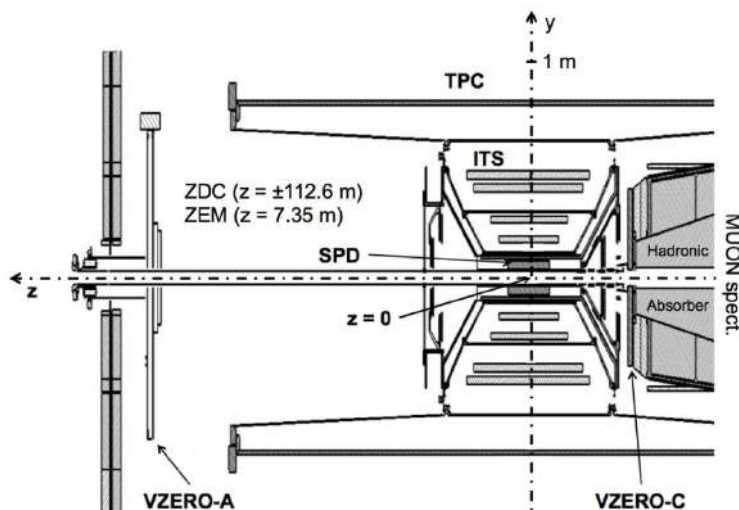
ALICE (A Large Ion Collider Experiment) es un experimento centrado en el estudio de colisiones de iones pesados en el LHC. Su objetivo es investigar la física de la materia que interactúa fuertemente en colisiones protón-protón (pp) y del plasma Quark-Gluon (QGP) en condiciones extremas de densidad de energía y temperatura en colisiones núcleo-núcleo. ALICE permite la identificación de partículas incluso en las más altas multiplicidades y en momentos transversales bajos ( $p_T$  50 MeV/c). Su programa de física también incluye colisiones entre protones y núcleos para analizar los efectos del núcleo frío, así como colisiones de iones más ligeros para variar la densidad de energía y el volumen de interacción. La recolección de datos en modo pp proporciona referencias para el programa de iones pesados y permite estudiar diversas propiedades específicas de la interacción fuerte, complementando así otros experimentos del LHC [13].

El aparato ALICE consta de un barril central, un espectrómetro de muones frontal y un conjunto de detectores en las regiones frontales que incluyen el sistema VZERO. Este sistema proporciona triggers para el experimento (trigger de sesgo mínimo o trigger de centralidad) y separa las interacciones haz-haz de los eventos de fondo como las interacciones haz-gas, ya sea a nivel de trigger o en análisis fuera de línea. Además, también se utiliza para medir la luminosidad del haz, la multiplicidad de partículas cargadas y las distribuciones azimutales. El control de la luminosidad permite la determinación del valor absoluto de la sección transversal de los procesos de reacción [14]. El conocimiento de la multiplicidad de partículas cargadas es esencial para la evaluación de la centralidad de las colisiones núcleo-núcleo. La distribución azimutal de las partículas es importante para determinar el plano de reacción de la colisión Pb-Pb.

La descripción detallada del sistema VZERO se puede encontrar en [15, 16] y en las referencias allí citadas. Está compuesto por dos conjuntos, VZERO-A y VZERO-C. Cada uno de los conjuntos VZERO está segmentado en cuatro anillos en la dirección radial, y cada anillo está dividido en ocho secciones en la dirección azimutal. Cada canal de ambos conjuntos está hecho de un centellador de plástico BC404 de Bicorn con un espesor de 2.5 y 2.0 cm para VZERO-A y VZERO-C respectivamente. Las fibras de desplazamiento de longitud de onda (WLS) BCF9929A de Bicorn están incrustadas en ambas caras de los segmentos (VZERO-A) o pegadas a lo largo de sus dos bordes radiales (VZERO-C). Estos dos diseños diferentes eran obligatorios para cumplir con las restricciones de integración de cada matriz. El VZERO-A está situado a 329 cm del vértice nominal ( $z = 0$ ) en el lado opuesto al espectrómetro de muones como se muestra en la figura 3.3 [11]. El VZERO-C está fijado en la cara frontal del absorbedor hadrónico.

La luz se transfiere al tubo fotomultiplicador (PMT) R5946-70 (Hamamatsu [17]) directamente para VZERO-A y a través de 3 m adicionales de fibras transparentes de PMMA (poli(metilmacrilato)) (Mitsubishi [18]) para VZERO-C. Los PMT de malla fina se eligieron por su capacidad para operar en un campo magnético, ya que los arreglos VZERO y sus PMT están dentro del solenoide ALICE que produce un campo de 0,5 T. Para minimizar la atenuación de la señal, el eje del tubo está orientado a  $30^\circ$  con

### 3. DETECTORES TIPO FORWARD



**Figura 3.3:** Posición de los dos detectores VZERO, dentro del diseño general del experimento ALICE

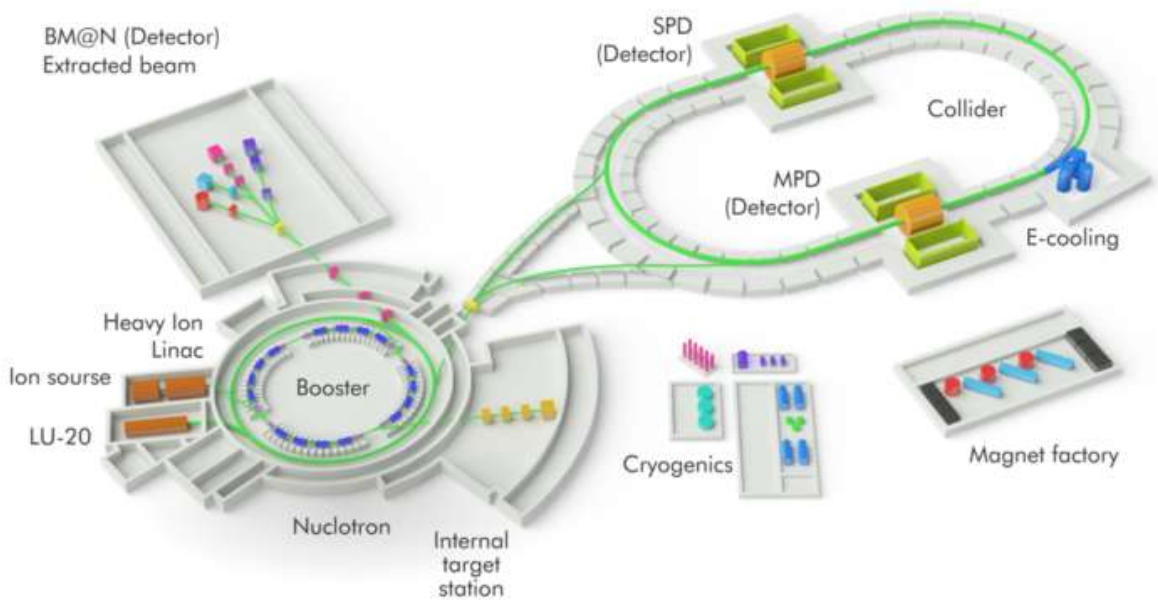
respecto a la dirección del campo magnético. Para los dos anillos externos del arreglo VZERO-C, cada sector está dividido en dos segmentos de  $22,5^\circ$  ambos conectados al mismo PMT. Esta separación fue necesaria para optimizar la recolección de luz por las fibras WLS pegadas en los bordes radiales de los segmentos.

La resolución temporal del detector V0 de ALICE es un aspecto crucial para su función en la determinación precisa del tiempo de colisión. El detector V0 tiene una resolución temporal de aproximadamente 1 nanosegundo (ns). Esta alta resolución temporal permite una identificación precisa del momento en que ocurren las colisiones y ayuda en la sincronización del sistema de detección de ALICE, así como en la diferenciación de eventos de interés de eventos de fondo.

## 3.2. Proyecto NICA

En Joint Institute for Nuclear Research (JINR) en Dubna, Rusia se construye un megaproyecto llamado NICA por sus siglas en inglés (Nuclotron-based Ion Collider Facility) como se ve en la figura 3.4 [19], el acelerador de partículas llamado nuclotrón es el núcleo de este proyecto y fue construido a mediados de los años noventa y ahora completamente actualizado, el cual permitirá recrear bajo condiciones de laboratorio el momento de formación de la materia inmediatamente posterior al Big bang, o sea, el propósito es estudiar las propiedades de la materia densa bariónica [19].

Sabemos que el universo surgió de la nada, al principio fue el Big Bang, luego un punto del tamaño de  $10^{-33}$  comenzó a expandirse rápidamente y a los  $10^{-44}$  segundos es cuando surge el universo [20] y para entender todo este se necesita del colisionador, conocemos que la estructura de un átomo está formada por partículas cargadas protones y electrones y después están los iones que son átomos que pierden un electrón y pasan a estar cargados, y en el momento de la colisión sueltan tanta energía que se desintegran en quarks y gluones, las partículas más pequeñas conocidas actualmente.



**Figura 3.4:** Complejo NICA y sus respectivos experimentos

Una parte de inyección del complejo NICA consta de un nuevo linac de iones pesados de 3.2 MeV/u, un nuevo sincrotrón superconductor Booster de 580 MeV/u, un sincrotrón superconductor modernizado de 3.9 GeV/u Nuclotron. El sistema de enfriamiento de electrones en Booster con una energía electrónica máxima de 50 keV se utiliza para acumular iones con energía de inyección y aumentar la densidad espacial de fase del haz a 65 MeV/u. Esta parte de inyección del complejo había iniciado con éxito su operación en marzo de 2022 proporcionando un haz de iones acelerado en tándem Booster-Nuclotron y extraído lentamente (hasta 10 segundos) en dos experimentos de objetivo fijo: Short Range Correlation (SRC) y Materia Bariónica en Nuclotrón (BM@N). La parte del colisionador del complejo NICA se encuentra actualmente en la etapa de

### 3. DETECTORES TIPO FORWARD

---

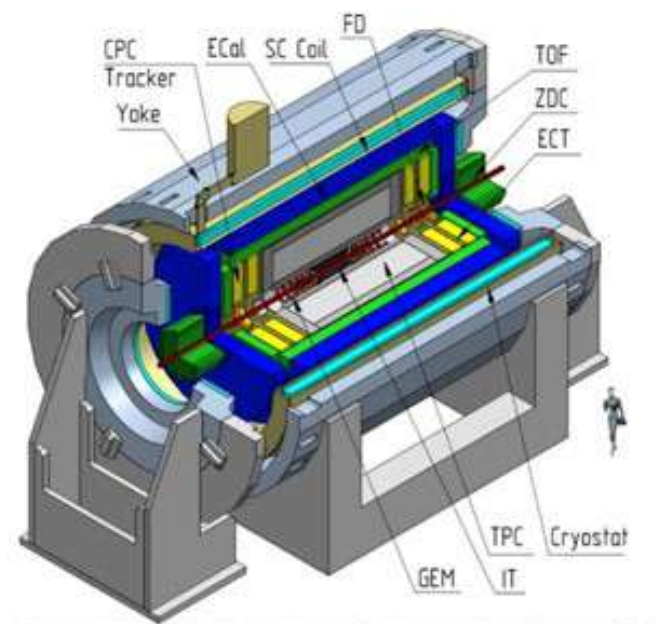
producción final y montaje. Ambos anillos colisionadores estarán equipados con sistemas de enfriamiento de electrones con una energía electrónica máxima de 2.5 MeV y sistemas de enfriamiento estocástico con un ancho de banda de 0.7 a 3.5 GHz [21]. Los sistemas se utilizarán para soportar la acumulación de haces y evitar el crecimiento de emisión debido a la dispersión dentro del haz. Se utilizan tres tipos de sistemas de RF para manipulaciones del espacio de fase longitudinal: cubo de barrera RF-1 para la acumulación del haz, desde haz continuo hasta agrupamiento de 22 haces mediante RF-2 (4 estaciones por anillo), y la formación de haces densos y cortos mediante RF-3 del armónico de 66 vueltas (8 estaciones por anillo) para operar en las colisiones. Varios laboratorios participan en el diseño y construcción del complejo acelerador NICA.

#### 3.2.1. Detector multipropósito (MPD)

El detector multipropósito MPD ha sido diseñado como un espectrómetro capaz de detectar hadrones, electrones y fotones cargados mediante colisiones de iones pesados a alta luminosidad en el rango de energía del colisionador NICA. Para alcanzar este objetivo, el detector comprenderá un sistema de seguimiento 3D preciso y un sistema de identificación de partículas (PID) de alto rendimiento basado en las mediciones del tiempo de vuelo y la calorimetría [22]. Los parámetros básicos de diseño han sido determinados por procesos físicos en colisiones nucleares en NICA y por varias limitaciones técnicas guiadas por un intercambio de seguimiento eficiente y PID contra un presupuesto material razonable.

El MPD tiene como objetivo estudiar el diagrama de fases de la materia QCD a las máximas densidades bariónicas posibles, para determinar la naturaleza de la transición de fase entre la materia desconfiada y hadrónica y buscar el punto final crítico. Es particularmente adecuado para buscar la existencia de un punto crítico a partir de las proporciones de acumuladores de carga conservados en función de la energía de colisión y el tamaño del sistema, para estudiar firmas de movimiento de vórtice y campo magnético, para efectos de restauración de simetría quiral midiendo dileptones en la región de masa intermedia, y para buscar hadrones exóticos y núcleos ligeros para estudiar su influencia en la ecuación de estado en altas densidades bariónicas. La etapa a gran escala del proyecto NICA está relacionada con la formación de haces en colisión con la luminosidad de diseño durante el funcionamiento de todos los sistemas de RF y el sistema de enfriamiento de electrones de alto voltaje en 2025, lo cual es más que un orden de magnitud mayor que la luminosidad que se logró en el programa BES en RHIC.

El detector para explorar el diagrama de fases de materia que interactúa fuertemente en un entorno de alta multiplicidad de pistas tiene que cubrir un gran espacio de fases, ser funcional a altas tasas de interacción y comprender una alta eficiencia y excelentes capacidades de identificación de partículas. El detector MPD, que se muestra en la figura 3.5 [22], cumple todos estos requisitos. Consta de un detector central (CD)



**Figura 3.5:** Detector MPD y los detectores que lo conforman

y dos espectrómetros directos opcionales (FS-A y FS-B). El CD consta de una parte cilíndrica y dos tapas finales. La parte del cañón es un conjunto de varios subdetectores. El rastreador principal es la cámara de proyección del tiempo (TPC) complementada por el rastreador interno (IT). IT y TPC deben proporcionar un seguimiento preciso, determinación del impulso y reconstrucción de vértices. El sistema de tiempo de vuelo (TOF) debe poder identificar hadrones cargados y cúmulos nucleares en un amplio rango de pseudorapidez. El calorímetro electromagnético (ECAL) debe identificar electrones, fotones y medir su energía con alta precisión [23]. El calorímetro de cero grados (ZDC) debe proporcionar la centralidad del evento y la determinación del plano del evento, así como medir la energía depositada por los espectadores. También hay un rastreador (ECT) y un detector forward rápido (FFD).

### 3.2.2. Detector Be-Be

Otro ejemplo de detector tipo forward, es BeBe el cual se construye en México, ya que para la primera corrida de NICA-MPD es conveniente contar con un detector capaz de identificar eventos de la colisión con una resolución temporal de alrededor de 100 ps, para que pueda proporcionar una señal que active el sistema TOF.

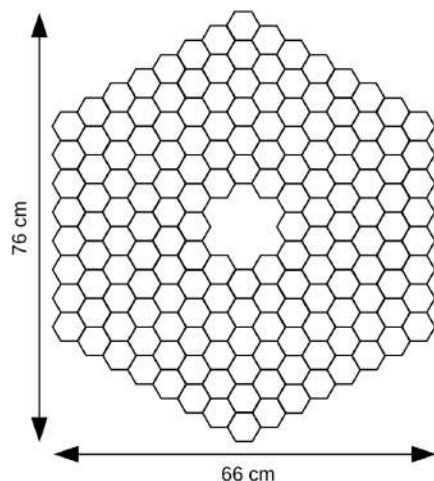
En esta tesis, se describe la geometría propuesta para el desarrollo de un monitor de

### 3. DETECTORES TIPO FORWARD

---

haz (BeBe) para el MPD, el diseño es parecido al contador haz-haz el cual se describe en [24]. Se espera que este monitor sea capaz de proporcionar una señal de disparo, así como medir centralidad y resolución del plano de eventos en colisiones de A+A. En determinadas condiciones de colisión podría proporcionar información adicional sobre las colisiones de p+A y p+p, por que lo convertiría en un detector complementario del FFD y al HCAL. Las celdas de BeBe estarán acopladas directamente a los fotomultiplicadores de silicio (SiPM). La geometría propuesta esta estrechamente relacionada con la utilizada por el experimento PHENIX-RHIC [25].

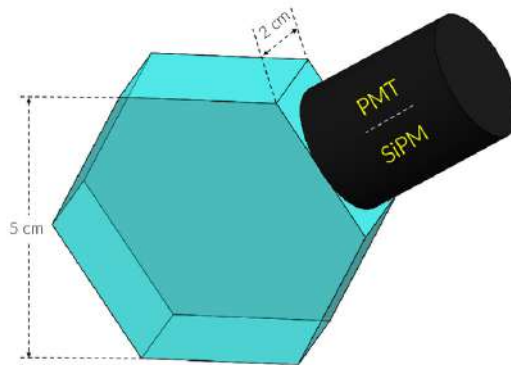
El sistema de monitoreo del haz debe cumplir varias propiedades para poder ser considerado como un trigger de nivel cero. Una de sus capacidades cruciales es la resolución temporal, este trabajo se enfoca en analizar la resolución temporal por celda de BeBe y que, para que sirva como trigger para el detector TOF en colisiones de baja multiplicidad, se espera que sea alrededor de los 100 ps y para cumplir con los requisitos del trigger se propone una geometría consista en dos detectores tipo hodoscopio, cada uno ubicado a 2 metros del punto de interacción, en lados opuestos. Cada detector propuesto consiste en una matriz de 162 celdas de plástico centellador hexagonales distribuidas en seis anillos concéntricos como se ve en la figura 3.6 [26], y también será útil para identificar y discriminar eventos verdaderos de eventos haz-gas. Además, los datos recabados se pueden utilizar para la reconstrucción de observables físicos de interés en colisiones de iones pesados, como la multiplicidad de partículas cargadas, la determinación de la centralidad de la colisión, la resolución del plano de eventos y la determinación de la sección transversal absoluta para mediciones de luminosidad.



**Figura 3.6:** Uno de los hodoscopios de la geometría de diseño BE-BE tal como se muestra en el entorno offline de MPD. Consta de 162 celdas hexagonales

En el año 2020 se hizo una prueba de haz, para calcular la resolución temporal

por celda [26], se realizaron pruebas para dos prototipos de celda Be-Be, basados en plástico centellador BC-404. Cada celda tiene forma hexagonal de 5 cm de alto y 2 cm de ancho. Para la recolección de la luz producida por el centellador se utilizó un PMT Hamamatsu y un SiPM SensL. En ambos casos el fotosensor se acopló a uno de los bordes de la celda utilizando grasa óptica como se muestra en la figura 3.7.



**Figura 3.7:** Prototipo de celda BE-BE individual. La celda hexagonal BC-404 tiene 5 cm de alto y 2 cm de ancho. Para el SiPM, el área sensible es de  $(6 \text{ mm})^2$  mientras que para el PMT es el área de un círculo de 1 pulgada de diámetro

La prueba de haz fue realizada bajo un haz de piones con una energía promedio de 5 GeV. La mejor resolución temporal alcanzada fue de  $68 \pm 5 \text{ ps}$  con el PMT acoplado al centellador y de  $45 \pm 2 \text{ ps}$  para el SiPM acoplado al centellador. Un objetivo de este trabajo, era llevar a cabo una prueba de haz para las celdas que fueron caracterizadas y conocer su resolución temporal bajo el haz que se encuentra en Rusia, bajo las condiciones necesarias para su posible aceptación en NICA, lo cual por motivos específicos no se logró y se caracterizó con fuentes radioactivas de laboratorio, de lo cual se hablará más adelante.



---

## Capítulo 4

# Metodología

---

Uno de los materiales principales para desarrollar un detector de centelleo es el plástico centellador (aunque puede ser cristal), ya que al interaccionar radiación ionizante en el plástico produce fotones ópticos que se dispersan en el material, normalmente se utiliza un material reflejante que forre el centellador, de esta manera la mayoría de los fotones sufren una reflexión dentro del material, de esta manera, los fotones no salen dentro del material, esto se hace para garantizar que los fotones ópticos producidos lleguen al Scorer y pueden contarse como pulsos electrónicos (en la sección [4.1.1](#) se da una mejor explicación del forrado).

Para realizar tanto la simulación como la parte experimental se eligió que la geometría fuera hexagonal esto debido a que en estudios previos se mostró que esta geometría permite tener una mejor aproximación para los anillos de los que se compone Be-Be.

### 4.1. Simulación Monte Carlo

Con la simulación se puede observar y conocer algunas características como, el tiempo de llegada de los fotones ópticos al Scorer que nos permite conocer el tipo de partícula que interaccionó, otra característica es la eficiencia la cual nos permite conocer la cantidad de fotones ópticos detectados, y la característica que mas nos importa es la resolución temporal intrínseca del material la cual nos permite conocer el tiempo mínimo de respuesta del centellador. Por lo tanto, simular este proceso físico que ocurre en el centellador nos permite compararlo con los resultados experimentales.

La cantidad de fotones ópticos detectados dependerá del tipo de partícula incidente y su respectiva energía.

El marco utilizado para la programación es el kit de herramientas de física de

partículas Geant4 que fue desarrollado en el CERN y está escrito en C++ [27].

Geant4 (Geometry and Tracking 4) es un kit de herramientas para la simulación de la interacción de partículas con la materia. Fue desarrollado por el CERN y es mayormente utilizado en muchos campos científicos, como la física de partículas, física médica, astrofísica, entre otros. Geant4 permite realizar simulaciones detalladas de cómo las partículas viajan e interactúan con diferentes materiales, considerando muchos tipos de fenómenos físicos, como colisiones, desintegraciones y procesos electromagnéticos.

De las clases mas relevantes que se utilizaron para realizar la simulación fueron las siguientes:

- `G4ParticleTable`: Es el catálogo global de partículas en Geant4. Se utiliza para acceder y gestionar la información sobre todas las partículas conocidas dentro de la simulación, como electrones, protones, neutrones, fotones, etc.
- `G4ParticleDefinition`: Representa la definición de una partícula en Geant4. Esta clase almacena todas las propiedades fundamentales de una partícula, como su masa, carga, espín, tiempo de vida, etc. Es decir, es la entidad que contiene la información física detallada de cada partícula individual. (Esta clase esta relacionada con la anterior ya que son esenciales para definir y acceder a las partículas disponibles en el sistema, así como para configurar sus propiedades.)
- `G4GeneralParticleSource`: Esta clase es muy versátil y permite generar partículas de diferentes tipos y con una variedad de configuraciones, como energía, dirección, posición, etc.
- `G4OpticalPhoton`: es una clase dentro de Geant4 que representa a los fotones ópticos. Estos son fotones en el rango de la luz visible, ultravioleta e infrarroja, y son fundamentales para simular fenómenos como: radiación Cherenkov, efecto de centelleo y transporte de luz en detectores.

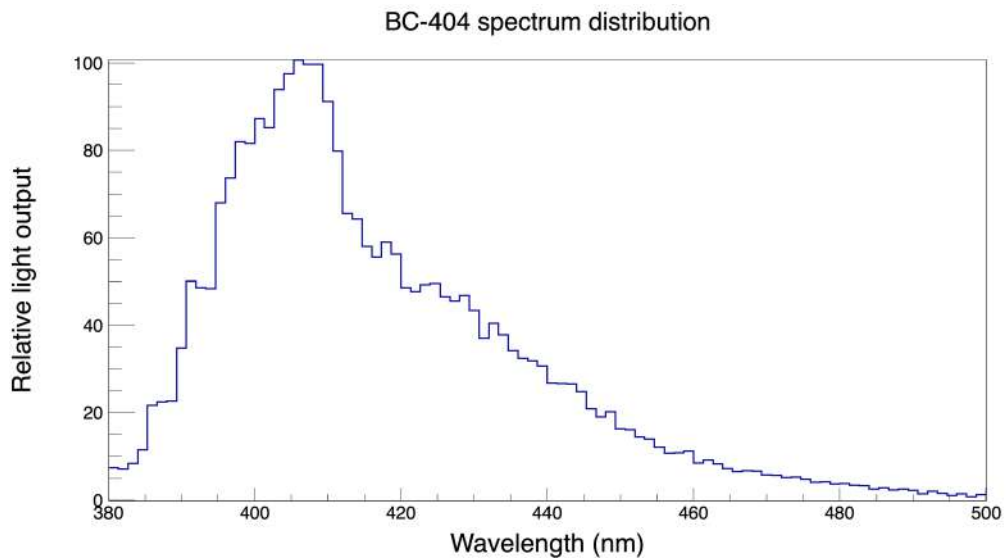
### 4.1.1. Características del plástico centellador

Los componentes del detector están colocados dentro de un volumen lleno de aire.

El material base para el plástico centellador BC-404 es poliviniltolueno, este material ya esta definido en el entorno de Geant4 por `G4 PLASTIC SC VINYL TOLUENE`. Todas las propiedades ópticas utilizadas para la simulación se tomaron de la hoja de datos de Saint Gobain BC-404[3] y la propiedad de salida de luz se tomó de un estudio de tesis[28]. Algunas de estas propiedades ópticas se muestran en la tabla 4.1. El espectro de emisión simulado se muestra en la figura 4.1. El material para los Scorer es simplemente silicio.

**Tabla 4.1:** Propiedades del plástico centellador BC-404

Salida de luz	68 %
Tiempo de subida	0.7 ns
Tiempo de bajada	1.8 ns
Longitud de onda de emisión	408 ns
Índice de refracción	1.58

**Figura 4.1:** Simulación del espectro de emisión para el plástico centellador BC-404

### 4.1.2. Parámetros ópticos de celda

El entorno Geant4 modela la física óptica, como ionización, efecto Compton, efecto fotoeléctrico, centelleo, efecto Cerenkov y la propagación óptica de fotones resultante [29]. La información principal para este trabajo proviene de los fotones ópticos, que se cuentan por la interacción en la superficie del Scorer.

En primer lugar se definieron los índices de refracción de todos los materiales, los cuales se muestran en la sección anterior. Se colocó un parámetro de 95 % reflejante para suponer que el centellador estaba cubierto por mylar, y para el caso de los Scorer se colocó un parámetro de 100 % absorbente, esto para asegurarnos que todos los fotones ópticos creados dentro del material centellador en cuanto lleguen al scorer se absorban y sean contados una sola vez. Entonces, la interfaz no es relevante y se consideró por dieléctrico-metal, dieléctrico para el centellador y metal para el scorer. Como los fotones ópticos no pasan o atraviesan el scorer, su ancho no es importante.

## 4.2. Simulaciones de celda

Se hicieron dos simulaciones la primera se hace para caracterizar la celda hexagonal, y la segunda para conocer el valor aproximado de la resolución temporal intrínseca.

### 4.2.1. Caracterización de celda

Esta simulación se hace con el objetivo de conocer el lugar óptimo para colocar el fotosensor en el plástico centellador y observar si existe alguna preferencia de parte de los fotones ópticos que se crean.

Entonces, se simularon scorers que cubran cada cara del hexágono completamente para garantizar que todos los fotones ópticos producidos lleguen a alguna de estas caras y no existan fugas.

Se hicieron tres configuraciones diferentes para la fuente de partículas: centro, esquina y de manera aleatoria, con la finalidad de conocer en que parte del hexágono los fotones ópticos llegan de manera homogénea, también para conocer la distribución de llegada de los fotones ópticos y saber en que cara llegan mas rápido.

### 4.2.2. Simulación resolución temporal intrínseca

Como se explico anteriormente la resolución temporal es una de las características mas importes para este trabajo. Entonces se realizo una simulación para calcular aproximadamente la resolución temporal intrínseca de esta configuración.

Normalmente los fotosensores son de  $6 \times 6 \text{ mm}^2$ , se tomó la decisión de realizar las respectivas simulaciones tomando el scorer de estas dimensiones.

Se realizaron las simulaciones con tres configuraciones diferentes para dos tipos de geometrías (cuadrangular y hexagonal).

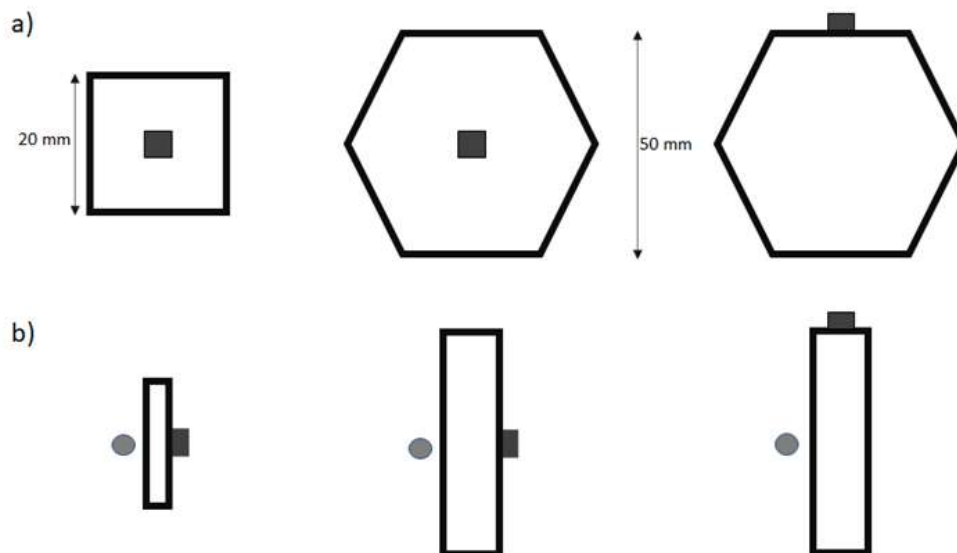
- Geometría cuadrangular con un área de  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  y un grosor de 3mm, con el scorer colocado al centro del plástico.
- Geometría hexagonal con 50 mm de alto por 20 mm de ancho, para esta geometría se consideraron dos arreglos.
  - Con el scorer acoplado a una de las caras hexagonales en el centro geométrico. (Primera configuración)
  - Con el scorer acoplado al centro en una de las caras laterales. (Segunda configuración)

Estas configuraciones son mostradas en la figura 4.2, donde vemos que la fuente de partículas se simuló en el centro geométrico de cada geometría y se ubicó a 1 mm del centellador plástico, el scorer representa un SiPM de marca SensL, el cual contamos en el laboratorio. No se consideró hacer la simulación con el scorer ubicado en la cara lateral de la geometría cuadrangular debido a su pequeño grosor.

Finalmente, todos los parámetros físicos de los fotones ópticos como energía, posición y tiempo de llegada se obtuvieron en la superficie del scorer. Además, la energía depositada de la partícula incidente se guardó y se obtuvo en el centellador. Esta última cantidad se utilizó para obtener una estimación de la medición experimental.

### 4.2.3. Fuentes de partículas simuladas

Se simularon cinco fuentes de radiación:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  y  $\mu^-$  de 1 GeV. Las primeras cuatro fuentes pertenecen a un kit que se puede encontrar en los laboratorios [30] y, para este estudio, se considera que su principal índice de ramificación es el decaimiento [31–34]. Las partículas  $\mu^-$  se consideran como un promedio de rayos cósmicos. Con base en estas especificaciones, las partículas y la energía de cada fuente se muestran en la tabla 4.2. En las siguientes secciones, nos referiremos a fuente



**Figura 4.2:** Ilustración de las tres configuraciones. a) vista frontal y b) vista lateral. El cuadrado y el hexágono representan el centellador de plástico BC-404, el cuadrado sólido representa el anotador y el círculo sólido representa el punto de interacción

para las fuentes del kit y a fuente  $\mu^-$  para el muón. Para cada fuente se consideraron 6,000 eventos, entendiéndose por evento único una partícula de la fuente que interactúa con el centellador BC-404. Finalmente, las partículas se concentraron en un radio de 2 mm, considerando la apertura efectiva de la fuente del kit y se ubicaron en el centro geométrico de cada configuración geométrica y a un milímetro de su superficie.

#### 4.2.4. Análisis de simulación resolución temporal intrínseca

Para obtener la resolución temporal intrínseca (ITR) de cada configuración se obtuvo el valor de tiempo de llegada de los fotones ópticos, este valor representa el tiempo promedio en el que los fotones ópticos llegan al scorer y se obtiene evento por evento. Posteriormente se obtuvo la distribución gaussiana a partir del conjunto de todos los valores medios del tiempo de llegada, para obtener el parámetro  $\sigma$  que representa el ITR. Esta técnica se ha comparado con el experimento [26] y también se utiliza para calcular la ITR para el detector MiniBeBe (descrito en la Sec. 6 en la Ref. [35]).

**Tabla 4.2:** Partículas y energía simuladas para cada fuente

Fuente	Partícula	Energía (MeV)
Na <sup>22</sup>	$\gamma$	0.511
	$\gamma$	1.275
Cs <sup>137</sup>	$\gamma$	0.6617
Co <sup>60</sup>	$\gamma$	1.170
Sr <sup>90</sup>	$e^-$	0.546
$\mu^-$	$\mu^-$	1,000

### 4.3. Configuración experimental

Los materiales del cual se compone el detector BeBe son principalmente de una tarjeta electrónica, un fotosensor y un plástico centellador, estos componentes en conjunto se pretende que se logre obtener una resolución de alrededor de los 100 ps, para que se logre se necesita hacer las respectivas caracterización al plástico centellador acoplado al fotosensor, ya que no es tan sencillo como la simulación, en el experimento para garantizar que los fotones ópticos o en este caso el centelleo que produce el plástico no se escape se tiene que cubrir bien el plástico con materiales que nos permitan comparar la simulación con el experimento, lo cual se explica en [4.3.1](#).

Con el experimento se puede observar y conocer los valores para la eficiencia, carga depositada y resolución temporal, siendo esta última la de mayor interés porque nos permitirá conocer el valor para el tiempo mínimo de respuesta del detector. Estos resultados nos permitirá compararlos con los que se obtienen de la simulación.

Se realizó la caracterización de cada una de las celdas que conformaran el primer anillo del monitor de haz, las cuales tienen geometría hexagonal con altura de 5 cm de alto y 2 cm de ancho. Cada celda tiene acoplado un fotosensor (SiPM) de 6×6 mm.

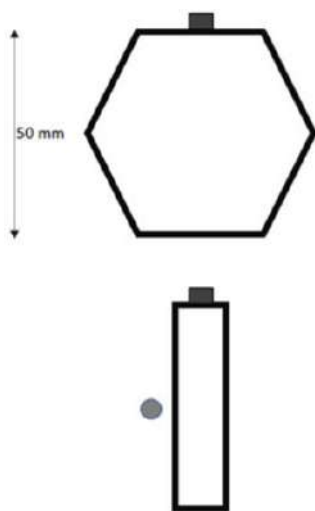
#### 4.3.1. Caracterización de celda hexagonal

Como el primer anillo de BeBe consiste en 6 celdas o hexágonos de plástico centellador, se comenzará por caracterizar cada una de las celdas para conocer sus valores de cada característica a analizar. Durante la manipulación de los plásticos centelladores se uso guantes para evitar dañarlos o contaminarlos.

#### 4. METODOLOGÍA

---

Para comenzar la caracterización lo primero que se hace es cubrir las celdas que constan de tres capas. La primera capa se forra con mylar que es un material reflejante, y las dos siguientes con tyvek que es un material que garantiza que no entre ni salga luz a la celda, por último se le acopla el fotosensor, que para este caso es el SiPM SensL, con cinta de aislar para asegurar el contacto entre el plástico y el SiPM, el cual va acoplado a una de las caras del perímetro de cada celda.



**Figura 4.3:** Celda con SiPM acoplado a una de las caras del perímetro

La primera caracterización que se realizó fue a los SiPM, para conocer su voltaje de operación óptimo, ya que como se explico anteriormente cada uno tiene un voltaje de funcionamiento óptimo. Dentro de la caracterización se consideraron dos parámetros que son voltaje vs amplitud y voltaje vs tasa de eventos, esto para conocer el comportamiento de cada SiPM acoplado al plástico.

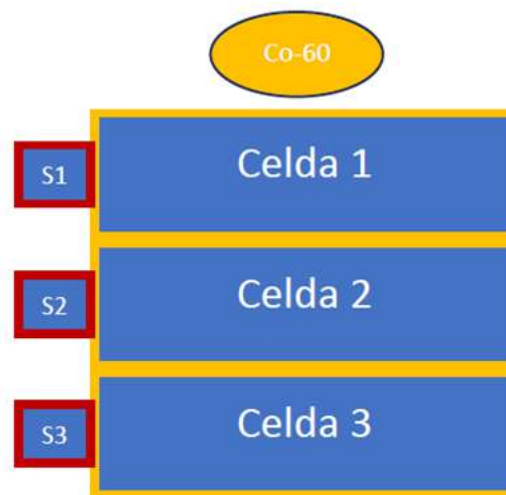
Se considera voltaje vs amplitud ya que dependiendo de la respuesta de cada SiPM pueden existir que algunos tengan una mayor amplitud que otra celda dependiendo del voltaje. Y se considera voltaje vs tasa de eventos, ya que dependiendo de la sensibilidad del SiPM alguna celda puede mostrar mayor tasa de eventos que otras.

Para realizar esta caracterización de lo que se hace es colocar una fuente de  $^{90}\text{Sr}$  arriba de la celda con una separación de 1 cm. luego conectar la celda al digitalizador para tomar los datos, y posteriormente se va haciendo un barrido en voltaje de operación desde 29V hasta 31V en pasos de 3mV, cada medición se hace por 10 minutos, los datos que se guardaron fue, la cantidad de eventos que hubo cada medición y todas las señales para analizarlas y conocer las amplitudes máximas de cada una de ellos.

### 4.3.2. Determinación de resolución temporal

Ya que se conoce el voltaje de operación óptimo de cada celda, sigue realizar el experimento para caracterizar cada celda y obtener el valor de resolución temporal y a partir de esto se podrá obtener el valor para la resolución temporal intrínseca.

En este experimento consiste en el siguiente arreglo experimental: se toman dos celdas las cuales van a servir de referencia, luego se toma una de las seis celdas y se van colocando entre las celdas de referencia como se muestra en la figura 4.4, en la parte superior de la celda que queda en la parte de arriba se coloca una fuente de  $^{60}\text{Co}$ , todo este arreglo se metió a una caja oscura para evitar que entrara luz cuidando que la configuración no se moviera ni sufriera cambios ya que todas las celdas deben quedar paralelas entre sí.

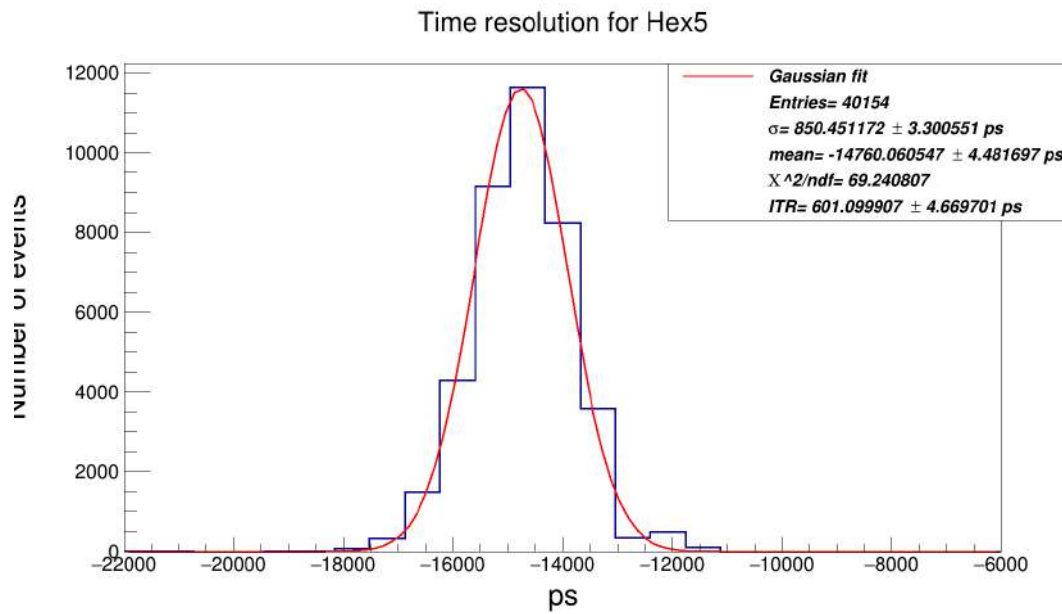


**Figura 4.4:** Configuración experimental

Para esta configuración experimental la conexión se hizo de la siguiente manera: se alimentaron los SiPM a una fuente de voltaje de 29.5 V, luego cada una de las celdas se conectaron a un CAEN V925 FanIN-FanOUT para meter todas las señales, estas señales fueron llevadas al CAEN V812 CFD, este nos proporciona una marca de tiempo en la fracción óptima de la altura del pulso, luego la señal fue llevada al CAEN V976 NIM Translator este modulo se uso con el fin de hacer las coincidencias entra la celda superior y la celda inferior ya que esta señal se usaba como trigger para activar al TDC, o sea, por último la señal llega al CAEN V1290N TDC, se conectaba el trigger y tambien al CH0 conectamos el trigger todas estas conexiones las podemos observar en el diagrama de la figura 4.5 esto se hace ya que queremos conocer la diferencia de tiempo entre cuando se activan las celdas de referencia y la que esta a prueba y así



se ajustan a una gaussiana, esto se hizo para todos los datos de cada celda, para el hexágono dos se obtuvo un valor para la ITR = 558.93 ps.



**Figura 4.6:** Ajuste de datos para resolución temporal intrínseca para el hexágono 2



# Resultados

---

## 5.1. Simulación

Analizando los datos para conocer el comportamiento de los fotones ópticos, se logró observar que, donde se coloca la fuente de partículas, ahí se concentra el mayor número de fotones ópticos creados debido a la interacción con el plástico centellador, ahora, cuando se simuló la fuente de partículas en una esquina del plástico se observó que los fotones ópticos tenían cierta preferencia muy cerca de la zona donde se creaban, por lo tanto, su distribución de llegada a las caras del plástico no era homogénea, pero cuando se simuló la fuente de partículas de forma aleatoria y al centro del plástico se pudo observar que la distribución de llegada era totalmente homogénea como lo podemos observar en la figura 5.1, con este análisis se dice que la mejor área para colocar el fotosensor sería el centro para cualquier cara del plástico.

Posteriormente se analiza cual cara del plástico centellador será la adecuada para colocar el fotosensor, analizando los tiempos de llegada de los fotones ópticos en cada cara del plástico, se observó que cuando se simula la fuente de partículas de forma aleatoria la distribución de los tiempos de llegada en todas las caras son largos esto quiere decir que a partir que se crean los fotones ópticos su camino óptico es muy largo para llegar al scorer, cuando la fuente de partículas se simula en la esquina la distribución de llegada de los fotones ópticos para las caras hexagonales es ligeramente menor comparada con la fuente aleatoria y en las caras del perímetro la distribución de llegada son mas cortos para las caras cercanas a la fuente en cambio para las caras mas alejadas los tiempos de llegada son largos, por último para la fuente de partículas simulada al centro se observó que la distribución de llegada de los fotones ópticos son similares para todas las caras del perímetro como lo podemos ver en la figura 5.2.

## 5. RESULTADOS

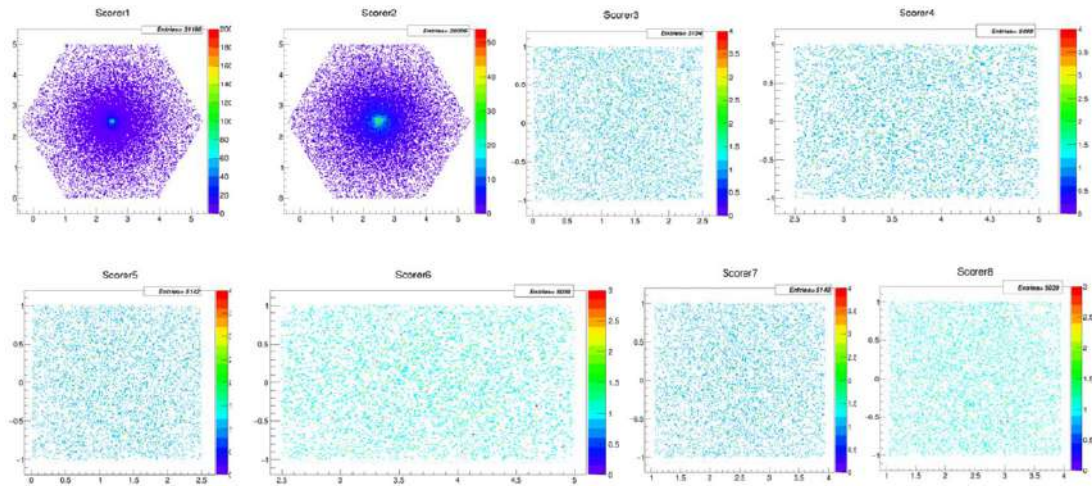


Figura 5.1: Distribuciones de fotones ópticos

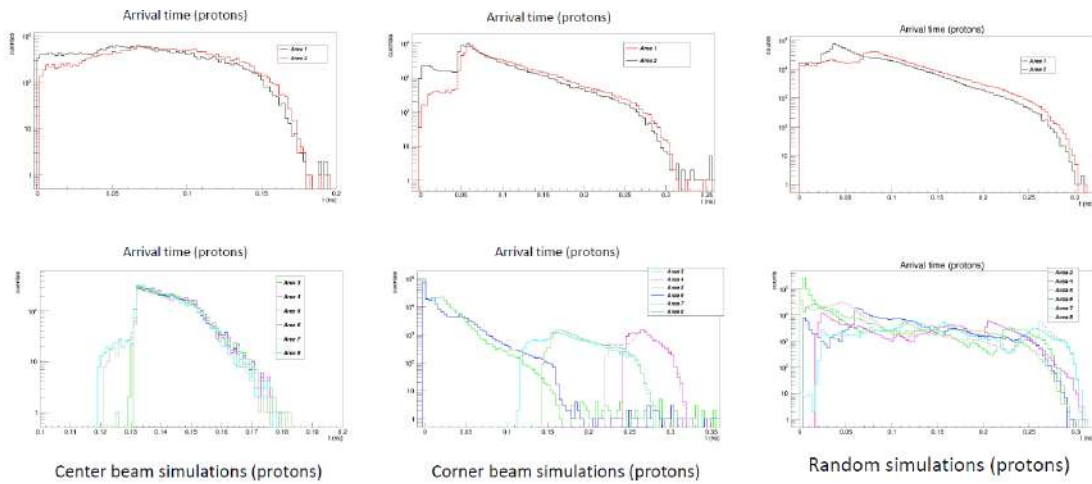


Figura 5.2: Distribución de tiempos de llegada de los fotones ópticos dependiendo del lugar de interacción

### 5.1.1. Resolución temporal intrínseca

Los plásticos centelladores (en este caso BC-404 [3]) no es particularmente eficiente para la detección de partículas  $\gamma$ , en cuyo caso se usa un cristal centellador [36], debido al número atómico del material y este efecto se observó durante simulación, donde se obtuvo que:

- En la geometría cuadrangular: para una media de cincuenta partículas  $\gamma$ , una de ellas interactúa con el plástico centellador.
- En la geometría hexagonal: por cada cincuenta partículas  $\gamma$ , en promedio, dos de ellas interactúan con el plástico centellador.

Esta diferencia en la interacción se debe al ancho, para la configuración cuadrada las partículas tienen una distancia de interacción más corta en comparación con el ancho de las configuraciones hexagonales.

Para las partículas  $e^-$  y  $\mu^-$  se obtuvieron eventos no nulos para todas las configuraciones.

Una de los resultados que se pudieron obtener para cada una de las fuentes simuladas es su respectivo espectro de energía depositada el cual vemos en la figura 5.3 a), a partir del cual si se decidiera se podrían hacer cortes en energía para tomar solo los eventos con la mayor energía depositada, al igual que se obtuvieron los espectros para las distribuciones de llegada de los fotones ópticos producidos en el plástico centellador como lo vemos en la figura 5.3 b), de la cual también se pueden hacer cortes en tiempo para quedarse con los eventos de tiempo corto. Y así haciendo cortes tanto en tiempo como en energía se puede mejorar la ITR de manera offline.

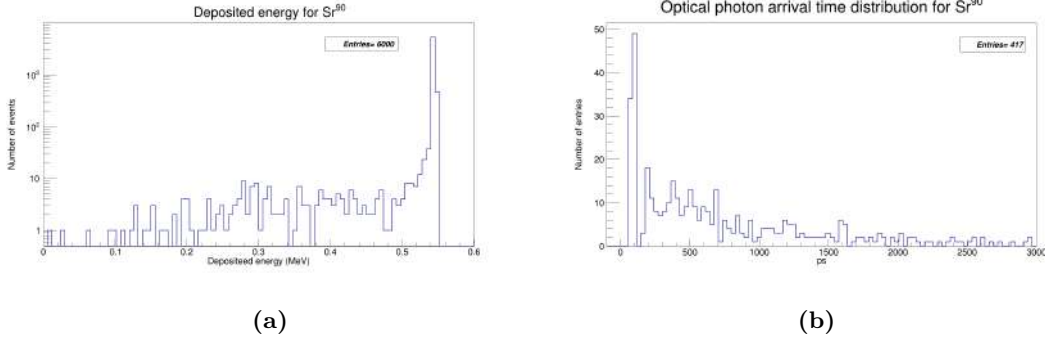
Se encontró que el comportamiento del tiempo de llegada para los fotones ópticos es el mismo como lo vemos en la figura 5.3, esto quiere decir que no existe una dependencia de la energía depositada. Para las demás fuentes se encontró un comportamiento similar.

Posteriormente para calcular el ITR primero se obtuvieron las distribuciones Landau como vemos en la figura 5.4, el cual se obtuvo evento por evento para cada fuente y configuración. Luego se obtuvieron las gráficas que representan todos los valores medios de tiempos de llegada 5.5 y los cuales nos dicen el valor de ITR aproximado para cada fuente y configuración. Ahora, como se dijo anteriormente que se pueden hacer cortes ya sea en energía y/o en tiempo para mejorar la ITR, se hicieron cortes tomando en cuenta su espectro de energía depositada como se muestra en la figura 5.6 donde vemos que la ITR se mantiene dentro del rango, y viendo la figura 5.7 se puede observar que debido a los errores se puede considerar que es la misma ITR para cada corte.

Los ITR más cortos se obtuvieron para la configuración cuadrangular la cual fue de  $1.88 \pm 0.01$  ps para la fuente de  $\mu^-$ , esto debido al pequeño tamaño del plástico, los

## 5. RESULTADOS

---



**Figura 5.3:** a)Energía depositada por <sup>90</sup>Sr, b)Tiempo de llegada de fotones ópticos para un evento

valores de ITR para todas las fuentes son consistentes de alrededor de 2 ps.

Los valores de ITR que se obtuvieron para las configuraciones hexagonales fueron de  $\sigma = 29.92 \pm 0.29$  ps y  $\sigma = 65.75 \pm 0.73$  ps para la primera y segunda configuración, respectivamente como se observa en la figura 5.10. Se obtienen los mismos resultados para el resto de fuentes, como se muestra en la figura 5.8. Se puede observar que el ITR es mayor para la segunda configuración que para la primera configuración para todas las fuentes. Esto se le atribuye a que el tiempo medio de llegada de los fotones ópticos, ya que el camino óptico para llegar al scorer es mucho mayor para la segunda configuración que para la primera configuración como lo podemos ver en la figura 5.9, ahí se puede observar que para la segunda configuración el camino óptico para llegar al scorer es mayor para la segunda configuración que para la primera configuración, esto debido a que los fotones ópticos producidos tardan mas en llegar al scorer que la primera configuración, por lo tanto el valor  $\sigma$  también es mayor. Para el caso de la fuente de  $\mu^-$  tiene los valores mas bajos de  $\sigma$  esto se debe a su gran energía, por lo cual se crean mas fotones ópticos.

De acuerdo con la tabla 4.2, la fuente <sup>90</sup>Sr tiene energía similar al resto de fuentes, sin embargo, esta fuente es de partículas cargadas y tienen masa diferente de cero. Como consecuencia de estas características las partículas  $e^-$  se detienen a una determinada profundidad, como se muestra en la figura 5.11 y esto sucede para todas las configuraciones. Se puede notar que la profundidad es la misma, ya que se esta utilizando el mismo tipo de plástico centellador. Para las ambas configuraciones hexagonales, las partículas  $e^-$  se detienen al atravesar apenas el 10% del ancho del material, por lo tanto, se crean muy pocos fotones ópticos en comparación con las otras fuentes que atraviesan el plástico y por lo tanto van creando fotones ópticos por todo su camino. Los fotones ópticos producidos por el <sup>90</sup>Sr en la primera configuración recorren un camino óptico mayor y por lo tanto el tiempo medio de llegada es mayor como se puede

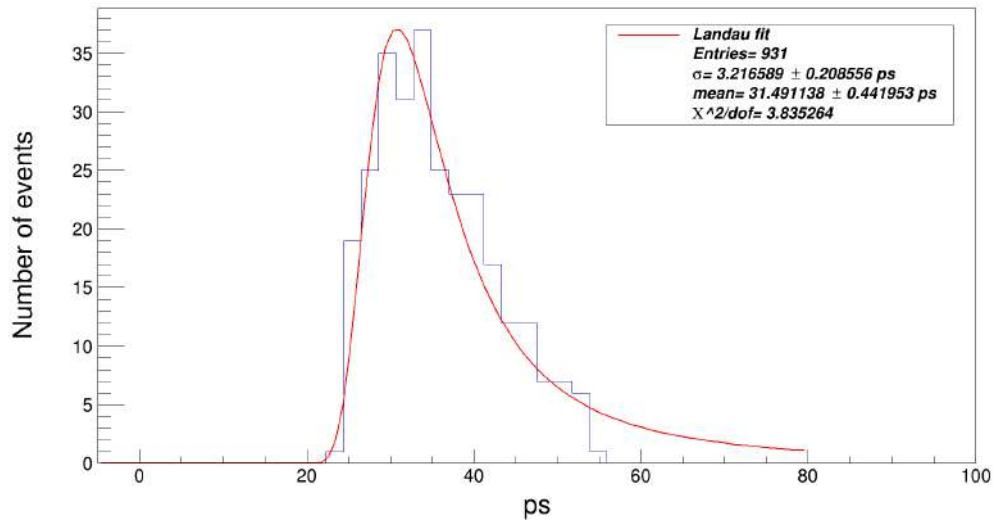


Figura 5.4: Ajuste Landau para los tiempos de llegada

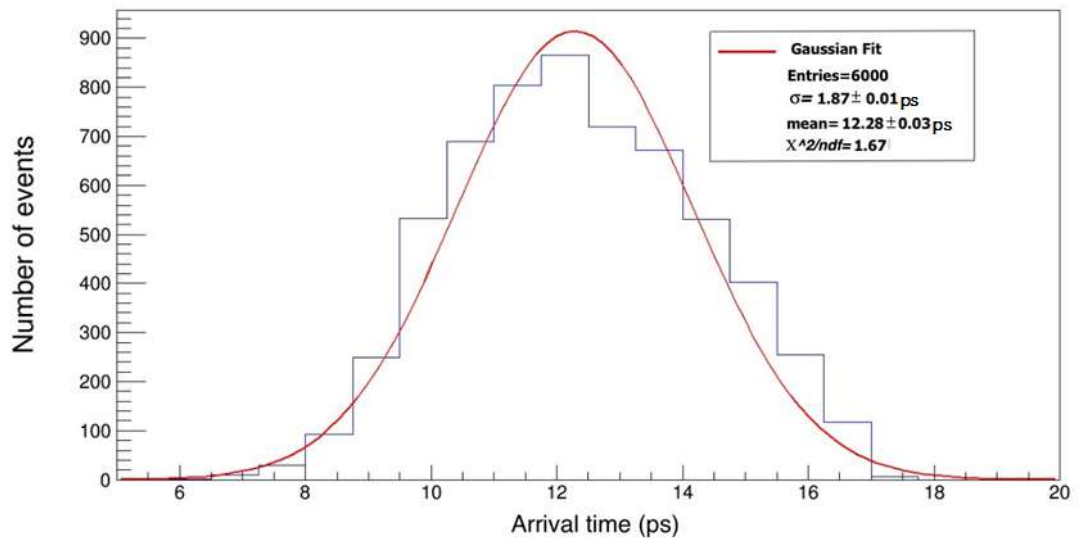
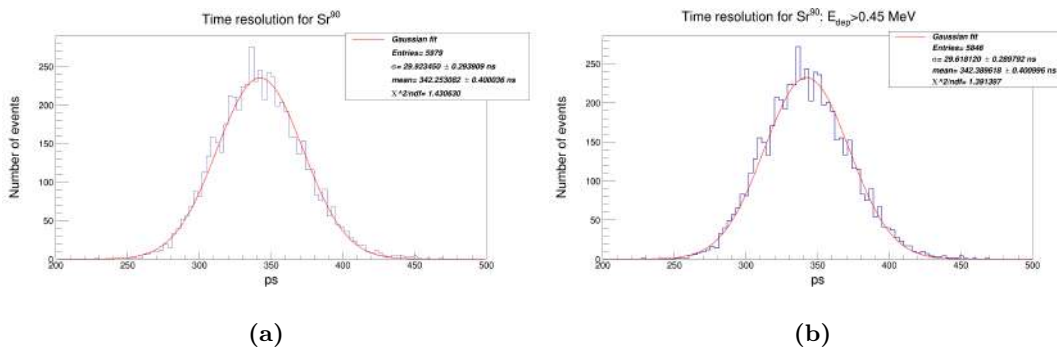
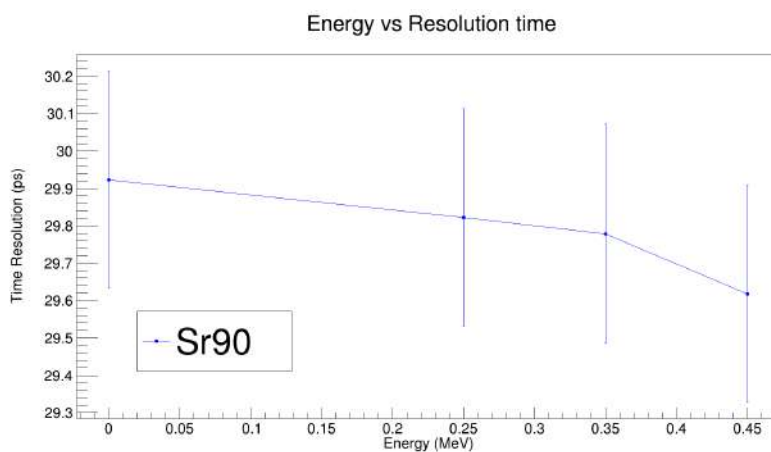


Figura 5.5: Distribución de los tiempos de llegada medio de los fotones ópticos para todos los eventos de  $Sr^{90}$

## 5. RESULTADOS



**Figura 5.6:** Resolución temporal para los fotones ópticos a) todos los eventos, b) los eventos con energía depositada mayor a 0.45 MeV



**Figura 5.7:** Resolución temporal intrínseca vs la energía depositada para la fuente  $^{90}\text{Sr}$

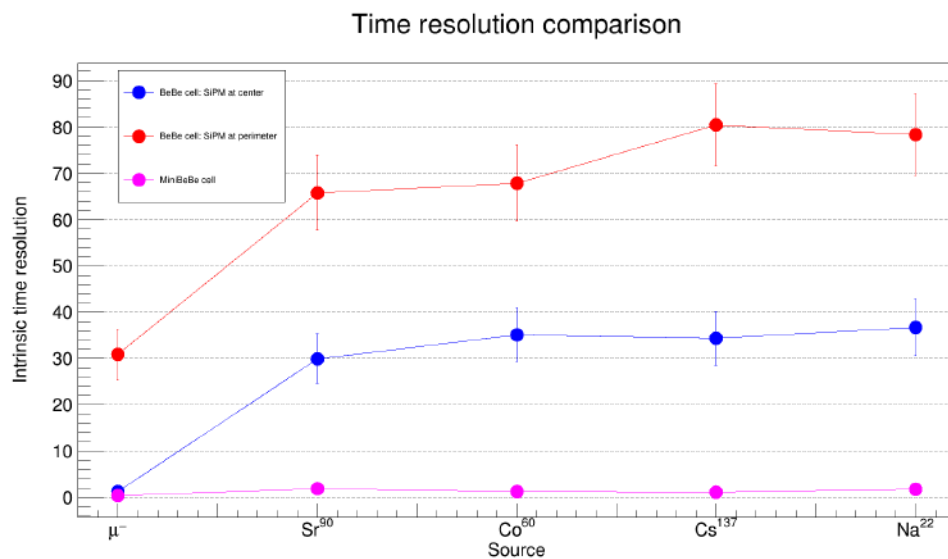


Figura 5.8: Comparación de resolución temporal intrínseca para todas las configuraciones

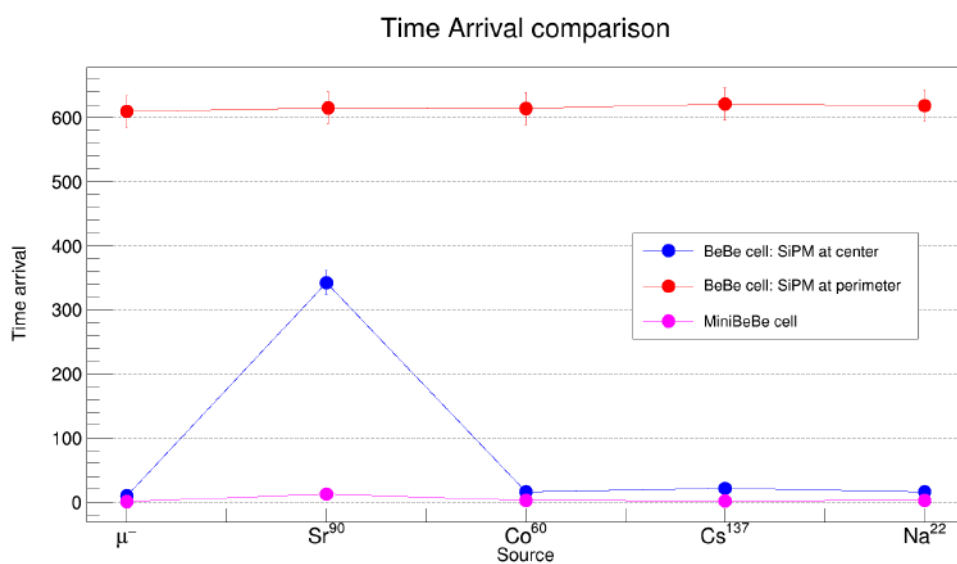
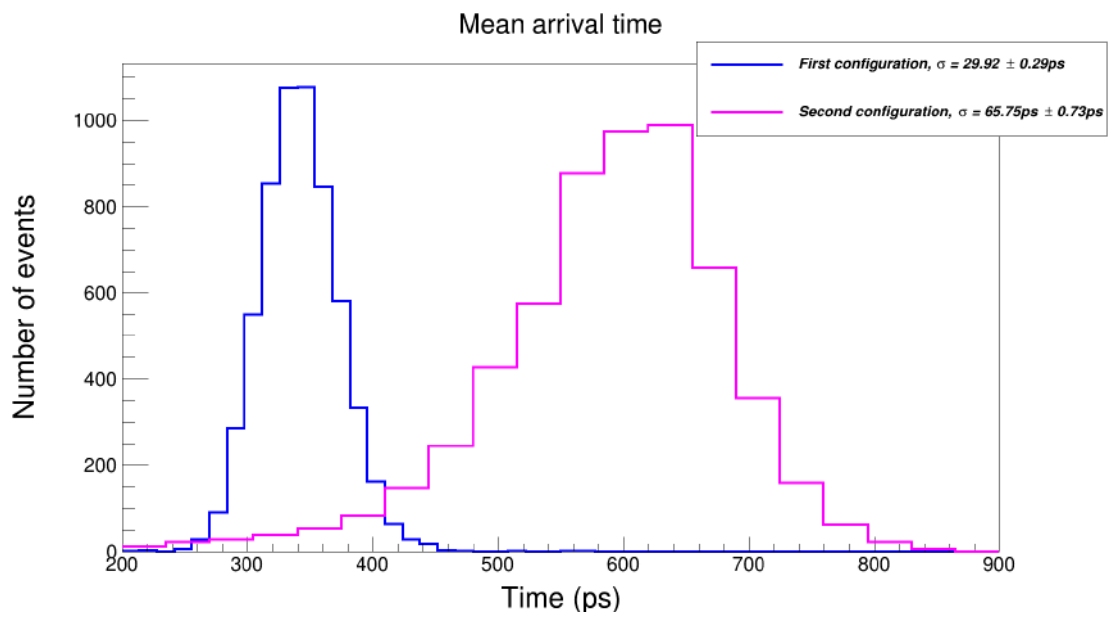


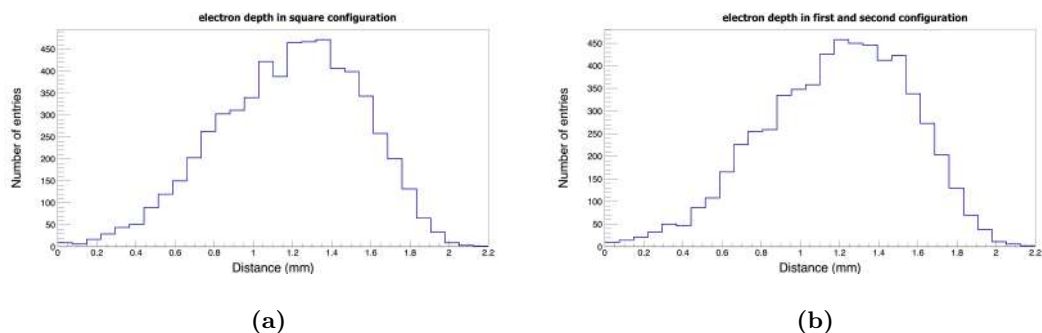
Figura 5.9: Comparación de los tiempos de llegada de los fotones ópticos para todas las configuraciones

## 5. RESULTADOS

---



**Figura 5.10:** Distribución óptica de los fotones ópticos con tiempo de llegada medio para la fuente Sr90 para el Scorer ubicado en el centro (línea azul) y en la parte superior (línea magenta)



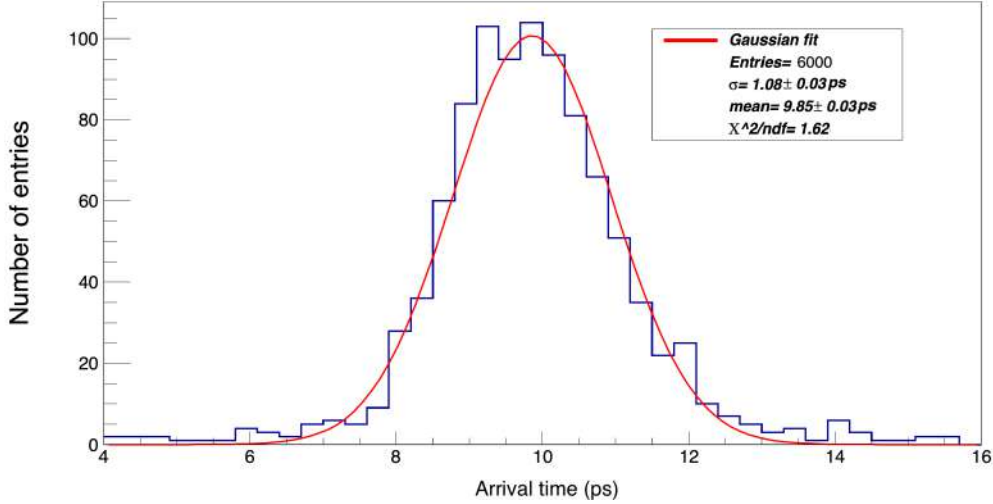
**Figura 5.11:** La profundidad alcanzada por el  $e^-$  emitido por  $\text{Sr}^{90}$  a) penetración del electrón en primera y segunda configuración, b) penetración del electrón para la configuración cuadrada

ver en la figura 5.9. Para la segunda configuración, el tiempo medio de llegada de los fotones ópticos debido al  $^{90}\text{Sr}$  es consistente con las otras fuentes, debido a la ubicación del scorer, por lo que el camino óptico es casi el mismo. Para el caso de la configuración cuadrangular se puede observar que el tiempo medio de llegada es ligeramente mayor, para este caso las partículas  $e^-$  se detiene en el 73.3 % del ancho, nuevamente el camino óptico es mayor, sin embargo, la diferencia con el camino óptico de los fotones ópticos producidos por otras fuentes no es tan grande en comparación con las configuraciones hexagonales.

Para las configuraciones hexagonales la fuente de partículas  $e^-$ , que si bien es una partícula masiva, tiene el menor valor de ITR, y esto se debe a la mayor energía de la partícula, por lo que su interacción con el plástico centellador produce muchos más fotones ópticos y por lo tanto la variación de los valores alrededor de la media (ITR) es menor. Para mostrar esta tendencia explicada se puede ver en la figura 5.12, en la cual se muestra el tiempo de llegada medio para la primera configuración.

### 5.1.2. Eficiencia

En la figura 5.13 se muestran los valores de  $\epsilon_I$  para todas las configuraciones y fuentes. Claramente, la configuración cuadrangular tiene el mejor valor de  $\epsilon_I$  y tiene mejores valores que las otras configuraciones hexagonales. Este fenómeno se debe al camino óptico, que para el caso de la configuración cuadrangular es menor que la hexagonal, entonces, la atenuación de la luz, se vuelve una cantidad relevante para la configuración hexagonal debido a su respectivo volumen. Finalmente, la ubicación del scorer también influye como se puede observar para la primera y segunda configuración. El efecto de la profundidad de la fuente de  $^{90}\text{Sr}$  se refleja en las configuraciones segunda y cuadrada.



**Figura 5.12:** Distribución de fotones ópticos de tiempo de llegada producidos por  $\mu^-$  que interactúan en primera configuración

La energía depositada ( $E_{dep}$ ) por la partícula incidente está relacionada y aumenta o disminuye con la carga depositada, la cual se puede obtener del pulso del fotosensor [37]. Para el caso donde se requiere medir simultáneamente la carga depositada y el tiempo de respuesta del detector, comúnmente se utiliza un convertidor de carga a digital (QDC) y un convertidor de tiempo a digital (TDC), respectivamente, para realizar un diagrama de dispersión. El tiempo de llegada medio está relacionado con el valor del TDC, como se muestra en la Ec. (1). Entonces, la relación de tiempo de llegada y  $E_{dep}$  está relacionada con los valores de TDC y QDC. A modo de ejemplo, en la figura 5.14 se muestran las relaciones de tiempo de llegada y  $E_{dep}$  para las fuentes de  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  y  $e^-$ , para el caso de configuración cuadrada y primera.

Como se mencionó anteriormente las partículas  $\gamma$  apenas interactúan con el plástico, por lo cual se obtiene un orden de eV en  $E_{dep}$ , además debido a la naturaleza de la partícula se obtiene un  $E_{dep}$  cuantificado. Además, se puede observar el efecto que se produce con el electrón, que no pasa por el centellador plástico y por tanto deposita toda su energía. Finalmente, la fuente  $e^-$  deposita más energía en configuraciones hexagonales que en la configuración cuadrada, debido al ancho del hexágono, en el cual interactúa más. Se obtuvieron relaciones similares con el  $^{60}\text{Co}$  para las fuentes de  $^{22}\text{Na}$  y  $^{137}\text{Cs}$ . Para la segunda configuración también se obtuvo relaciones similares, teniendo valores de tiempo de llegada mayores que en la primera configuración.

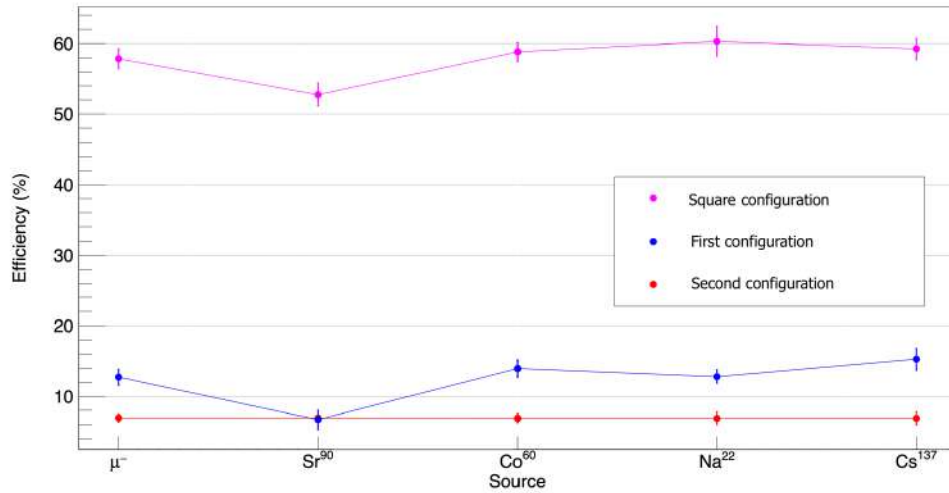


Figura 5.13: Comparación de la eficiencia

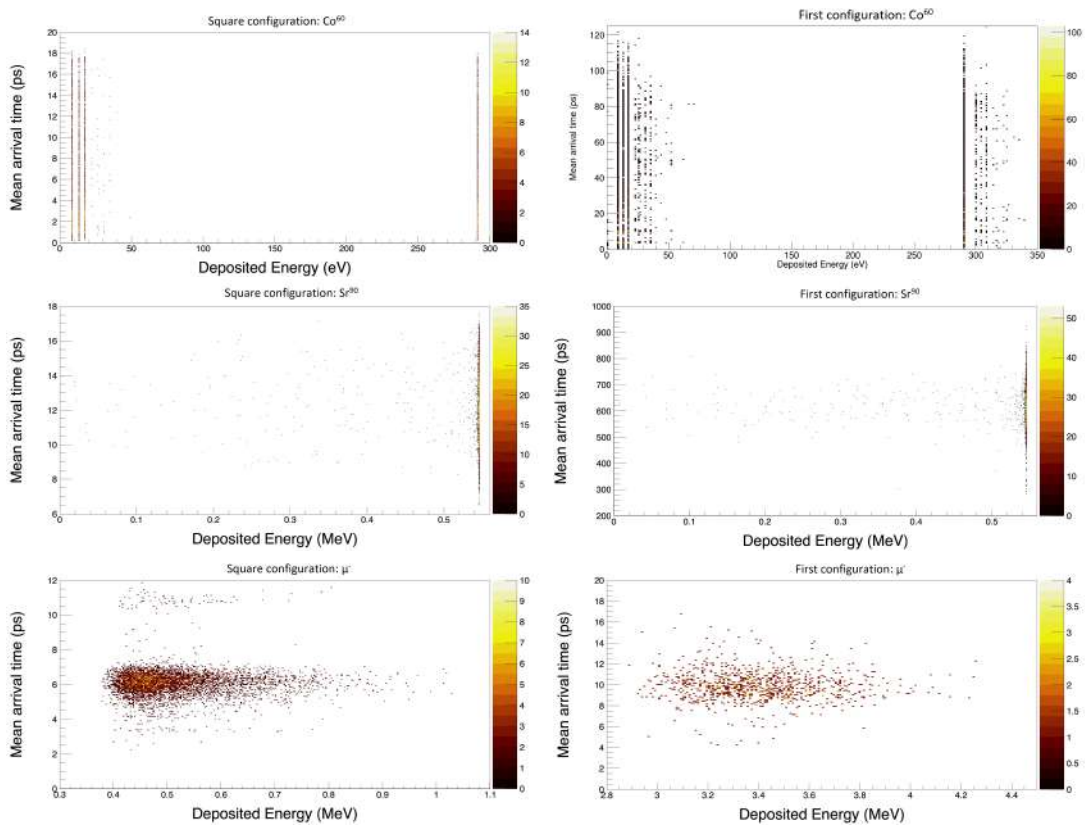
## 5.2. Resultados Experimentales

### 5.2.1. Caracterización de voltaje óptimo

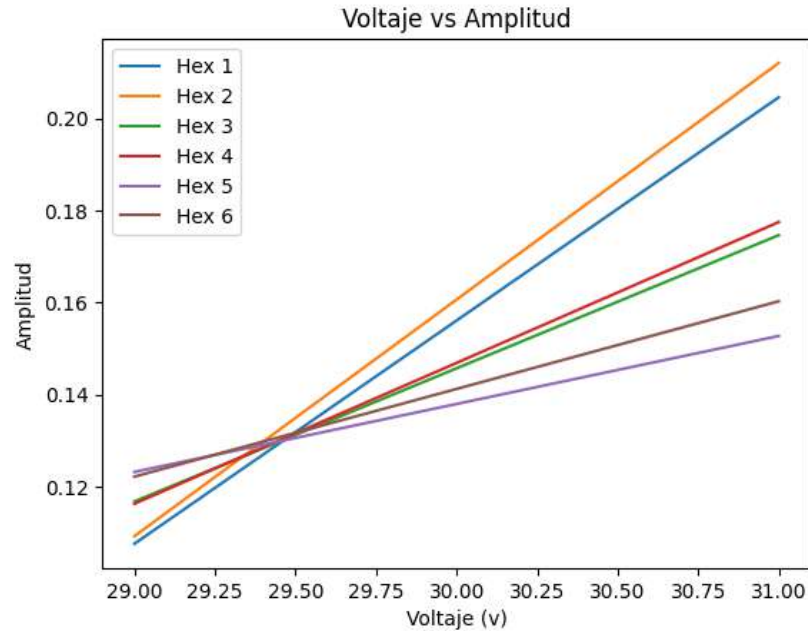
A partir del experimento de caracterización de cada celda para encontrar el voltaje óptimo de operación se obtuvo para "Voltaje vs Amplitud" que todos los SiPM tienen un comportamiento similar entre más aumenta el voltaje incrementa la amplitud de los pulsos, esto no quiere decir que se pueda aumentar el voltaje sin control ya que tienen un voltaje donde su comportamiento no se puede predecir, para este caso resultó que mejor voltaje de operación es alrededor de 29.50 V ya que es en donde coinciden las curvas de cada celda como se observa en la figura 5.15.

Ahora, para el caso de "Voltaje vs Tasa de eventos", se obtuvo que el comportamiento de los SiPM es casi similar para los voltajes más bajos, luego va creciendo la tasa de eventos conforme el voltaje va aumentando, cuando llega todos a la polarización de 31 V se aprecia que la curva se comienza a aplanar como se observa en la figura 5.16, lo que significa que a partir de ese voltaje el comportamiento del SiPM no es óptimo, a partir de este análisis se podría decir que hay dos caminos para realizar los experimentos, uno es colocar su propia fuente de voltaje a cada SiPM, esto para colocar cada fuente en su voltaje de operación óptimo y asegurar que la tasa de eventos por tiempo es la misma en promedio para cada celda, esta opción es buena pero resultaría un poco más costosa al tener una fuente propia por celda además de contemplar a la PCB un componente más para regular la fuente; en cambio, si solo se cuenta con una fuente

## 5. RESULTADOS



**Figura 5.14:** Relación entre el tiempo medio de llegada y la energía depositada para la configuración cuadrada (izquierda) y la primera configuración (derecha) para las fuentes  $Co^{60}$  (fila superior),  $Sr^{90}$  (fila central) y  $\mu^-$  (fila inferior)



**Figura 5.15:** Gráfica de voltaje vs amplitud de las celdas

disponible y conectar todas las fuentes en paralelo es buena opción, para este trabajo se consideró una sola fuente para todas las celdas, la cual se eligió poner de 29.50 V, por lo mencionado anteriormente.

### 5.2.2. Resultados para ITR

Al hacer el análisis para obtener los resultados para la resolución temporal intrínseca, se obtuvo que cinco de las seis celdas tienen un comportamiento similar donde la mejor resolución temporal intrínseca la tuvo la celda 4, dando un  $\sigma = 456.41$  ps con un error = 18.05 ps, y la celda con la menor ITR fue la celda 3 con un  $\sigma = 868.45$  ps con un error = 15.17 ps, esta baja ITR se puede deber a que el plástico centellador se encuentre dañado, o sea, rayado por un mal manejo del material o que este menos transparente que los otros plásticos que a simple vista se ven con la misma transparencia, por otro lado podría ser que el fotosensor este rayado, todas estas malas condiciones se pueden atribuir a que el fotosensor está acoplado al plástico centellador sin grasa o pegamento óptico. En la figura 5.17 se observan los resultados para la ITR de cada celda y donde se aprecia que las celdas 1, 2, 5 y 6 con sus respectivas barras de error se tocan, esto quiere decir que sus ITR son las mismas y lo que se esperaba es que todas las celdas se encontraran dentro del mismo rango de tiempo.

## 5. RESULTADOS

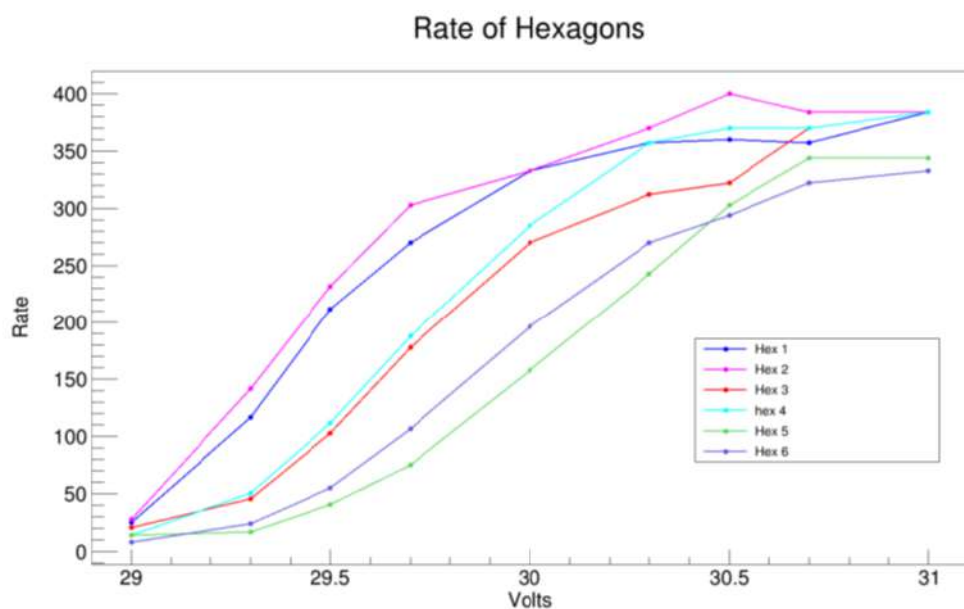


Figura 5.16: Gráfica de Voltaje vs tasa de eventos

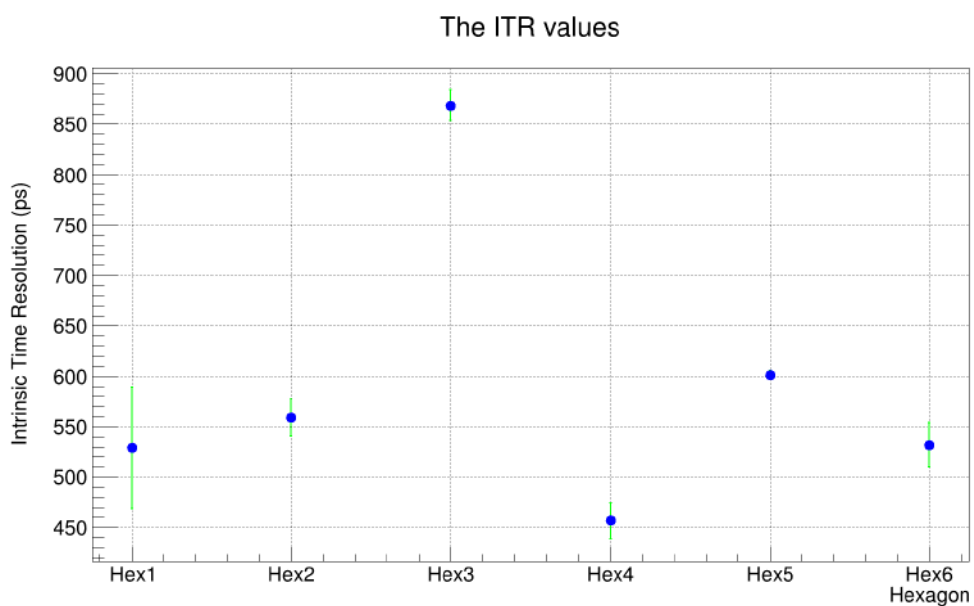
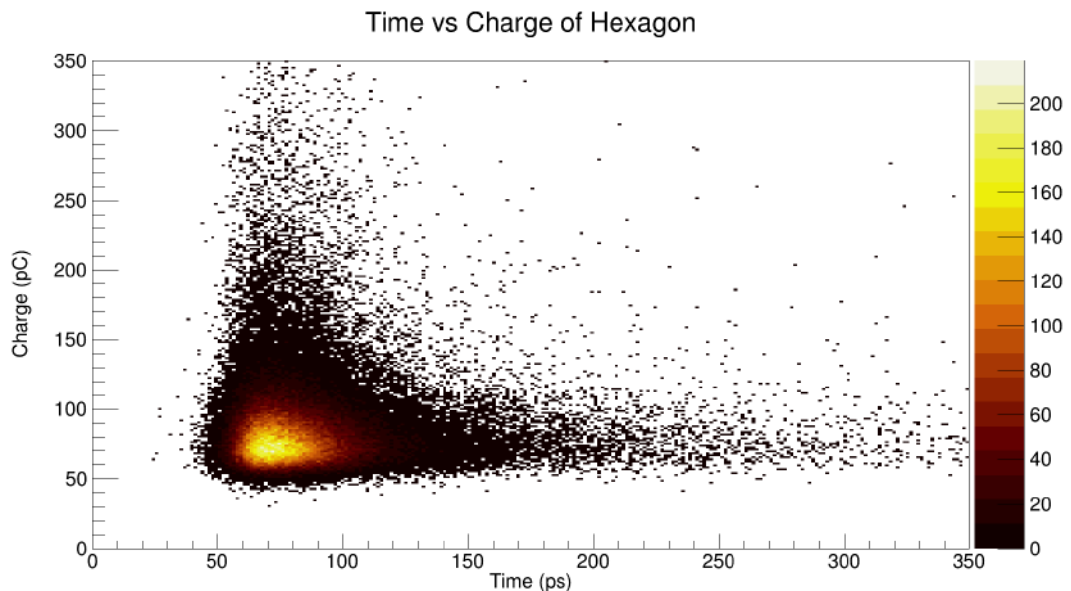


Figura 5.17: Comparación de resolución temporal intrínseca para todas las celdas

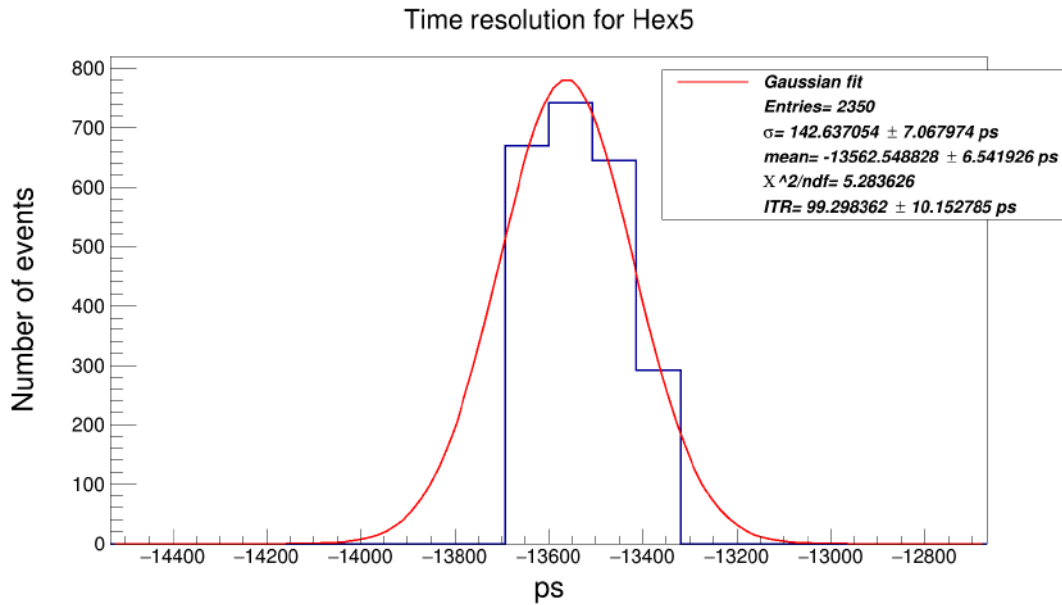
Posteriormente al hacer el análisis anterior, lo que se busca es mejorar aún más el ITR, por lo tanto, al tener todos los datos en crudo se puede hacer un análisis más a fondo, el cual permite que se pueda seleccionar los datos de mayor interés. En la figura 5.18 se observa un gráfico de tiempo vs carga depositada, donde se notan los eventos de mayor interés, entonces haciendo cortes en tiempo como carga depositada y tomando los eventos que se concentran en la sección más brillante. Haciendo estos cortes nos da como resultado una curva con mejor  $\sigma$  como lo vemos en la figura 5.19, en la que se observa que los eventos seleccionados disminuyen debido a los cortes y el  $\text{ITR} = 99 \pm 10.15$  ps.



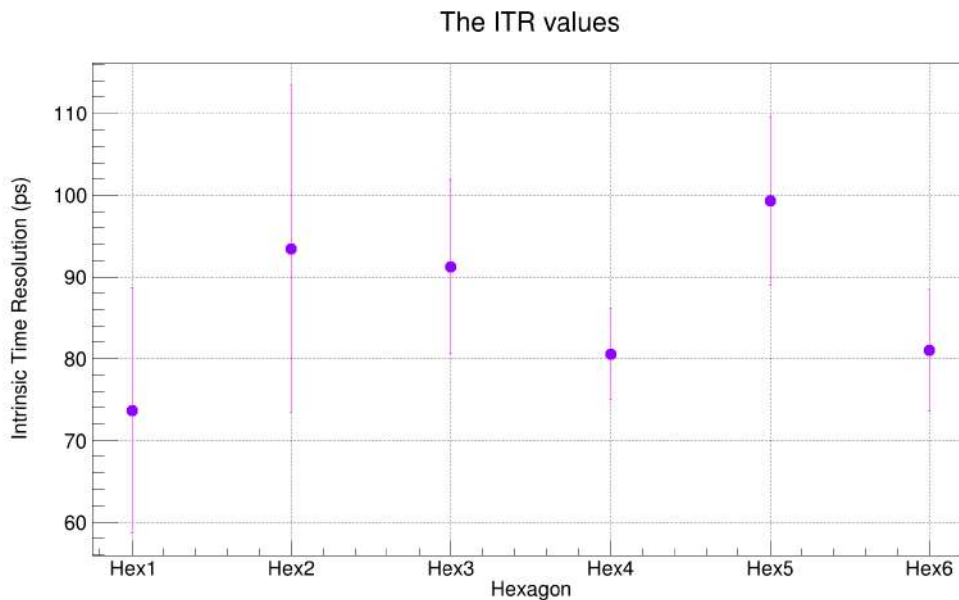
**Figura 5.18:** Distribución de tiempo vs carga depositada de todos los eventos

Ahora, haciendo el mismo análisis para todas las celdas se obtiene que el ITR es de alrededor de 90 ps como se observa en la figura 5.20, se podría esperar que tuviera el mismo comportamiento que la figura 5.17, o sea, que la celda 3 tuviera la peor ITR, pero no es así ya que al hacer los cortes en tiempo y carga depositada, los datos se ajustan de diferente forma y el resultado cambia, aunque para el caso de los cortes se observa que las barras de error de todas las celdas se tocan, esto quiere decir que todas se encuentran en el mismo rango de tiempo, como se esperaba.

## 5. RESULTADOS



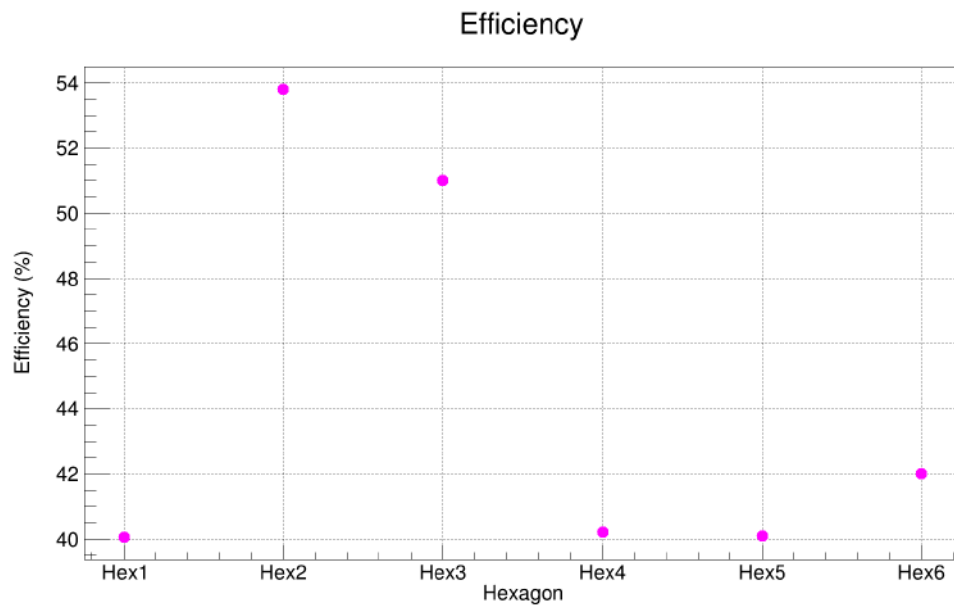
**Figura 5.19:** Ajuste gaussiano para mejorar la resolución temporal intrínseca



**Figura 5.20:** Comparación de la mejora de la resolución temporal intrínseca para las celdas

### 5.2.3. Eficiencia

A partir de los datos obtenidos se analizó la eficiencia para cada una de las celdas como se observa en la figura 5.21, donde se nota que la celda con una mayor eficiencia es la numero 2 con  $\epsilon_I = 54\%$  seguida de la 3 con  $\epsilon_I = 53\%$  el resto de celdas se encuentra en el rango de 41 %.



**Figura 5.21:** Comparación de eficiencia para todas las celdas

## 5.3. Primer anillo de BeBe

Se hizo la estructura para el primer anillo de BeBe, el cual se diseño en SOLIDWORKS y se imprimió con material PLA como se ve en la figura 5.22, donde se observan las comparaciones de medidas de la estructura del anillo con una moneda de 5 pesos mexicanos y una regla de 15 cm.

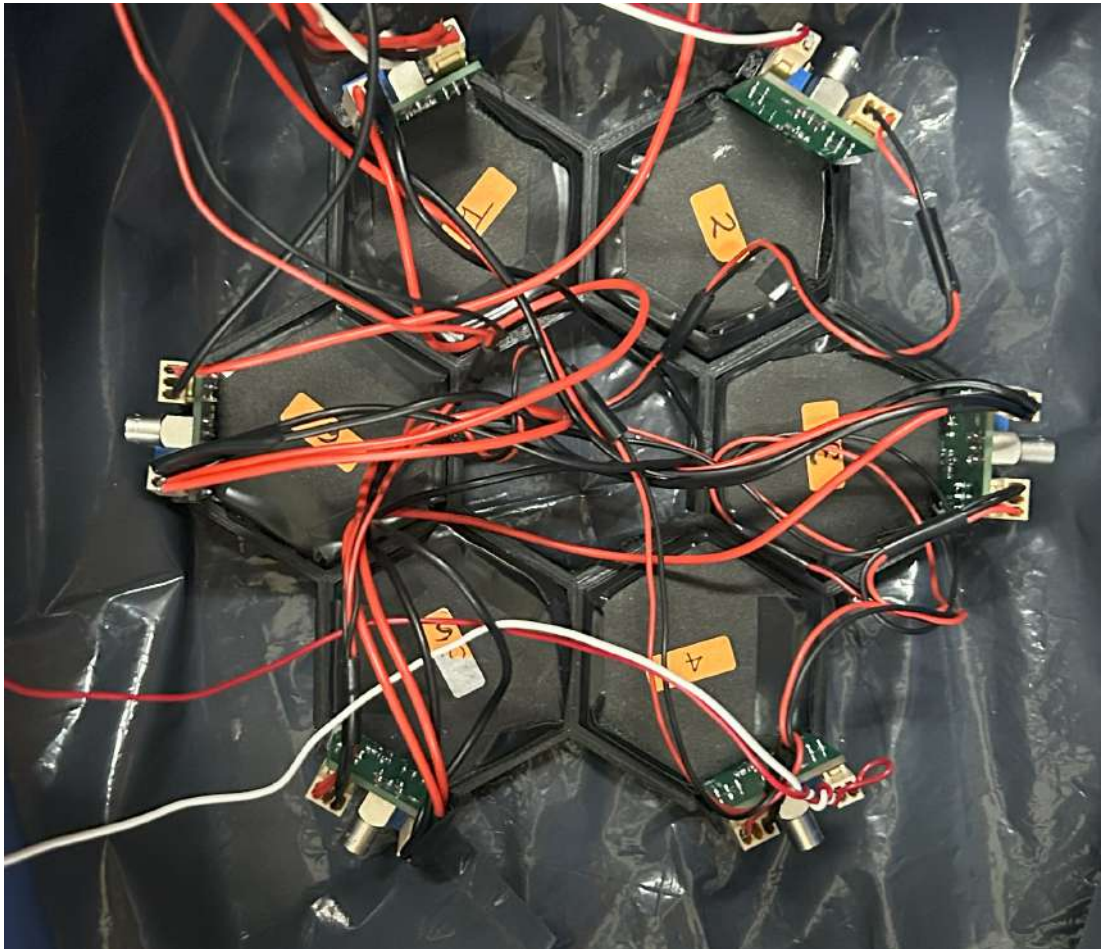
En la figura 5.22 se observa la estructura del primer anillo de BeBe con las celdas hexagonales y la electrónica para hacer las pruebas pertinentes.

## 5. RESULTADOS

---



**Figura 5.22:** Comparación de medidas para el primer anillo de BeBe



**Figura 5.23:** Estructura de BeBe con celdas y electrónica



## Conclusiones

---

En este trabajo mostramos resultados de simulación y experimentales. En la parte de simulación se ha demostrado que la mejor posición para colocar un fotosensor en el plástico centellador y se pueda captar la mayor información posible es colocarlo al centro de cualquier cara para la geometría hexagonal, ya que en esta cara también se da el menor tiempo tiempo de llegada de los fotones ópticos. Por otro lado, se ha demostrado que el ITR y, por tanto, el TR no son constantes, es decir, dependen de la energía, del tipo de partícula, del punto de interacción, de la localización del Scorer (también del número de ellos [26]) y del tamaño, y geometría del centellador plástico. El centellador de plástico BC-404 de pequeño tamaño exhibe un ITR cercano a 2 ps, que también es independiente del número de anotadores [35]. Mientras que para un tamaño grande, el ITR y TR varían y en particular aumentan respecto a un tamaño pequeño. Otra característica de un detector de centelleo que también debe considerarse es el AT. Esta cantidad también depende de las características mencionadas anteriormente. Mientras que el ITR puede ser similar o consistente para la fuente del kit, el AT varía para Sr90, debido a la energía del , que no atraviesa el material, por lo tanto, esta fuente se detecta en un tiempo mayor que el resto de las fuentes del kit. Finalmente, la última característica que proponemos para un detector es la eficiencia intrínseca, la cual permite conocer la cantidad de fotones ópticos detectados por la configuración y geometría de un detector y la partícula incidente.

Anteriormente se realizó un análisis de ITR para la segunda configuración [26], a partir de estos resultados confirmamos que el valor de ITR es diferente dependiendo del tipo de partícula y energía. En el detector BeBe se implementará una de las configuraciones hexagonales, en la que un valor bajo de ITR y TR no es importante para su propósito [38].

Para el caso experimental se logró caracterizar una celda hexagonal de Be-Be, para la cual se muestra la configuración ideal para el caso de voltaje óptimo vs la amplitud de las señales el cual resultado ser de alrededor de 29.50 V. También se mostró que el voltaje óptimo vs el rate de la celda fue de alrededor de 31 V, se eligió el voltaje de 29.5

## 6. CONCLUSIONES

---

ya que solo se contaba con una fuente para alimentar a las celdas, ambos experimentos se realizaron a las 6 celdas que conforman al Be-Be.

Se logró obtener experimentalmente una ITR de  $\sigma = 456.41 \pm 18.05$  ps y haciendo cortes tanto en tiempo como en carga depositada se logro mejorar la ITR alrededor de  $\sigma = 75 \pm 13.05$  ps que es consiste con la resolución temporal intrínseca obtenida en simulación la cual fue de  $67.86 \pm 1.16$  ps.

# Bibliografía

---

- [1] Novusmed. Acerca de la radiación — MDT Chile, 7 2020. [4](#)
- [2] Polystyrene-based scintillators. [7](#)
- [3] CRYSTALS SAINT-GOBAIN. BC400 BC404 BC408 BC412 BC416 Data Sheet. [/https://www.physics.purdue.edu/~jones105/phys56400\\_Fall2017/sgc-bc400-404-408-412-416-data-sheet.pdf/](https://www.physics.purdue.edu/~jones105/phys56400_Fall2017/sgc-bc400-404-408-412-416-data-sheet.pdf/), 2018. [10](#), [30](#), [43](#)
- [4] Bharadwaj. VI Characteristic of a Diode - Engineering Tutorial, 7 2016. [13](#)
- [5] <https://www.onsemi.com/pub/collateral/and9770-d.pdf>. Accessed: 2024-9-26. [14](#), [15](#)
- [6] H.Chr. Kästli, W. Bertl, W. Erdmann, K. Gabathuler, Ch. Hörmann, R. Horisberger, S. König, D. Kotlinski, B. Meier, P. Robmann, T. Rohe, and S. Streuli. Cms barrel pixel detector overview. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 582(3):724–727, 2007. VERTEX 2006. [18](#)
- [7] Steinar Stapnes. Detector challenges at the lhc. *Nature*, 448(7151):290–296, 2007. [18](#)
- [8] Sruthy Jyothi Das, Giuliano Giacalone, Pierre-Amaury Monard, and Jean-Yves Ollitrault. Relating centrality to impact parameter in nucleus-nucleus collisions. *Phys. Rev. C*, 97:014905, Jan 2018. [18](#)
- [9] Igor Altsybeev and Vladimir Kovalenko. Classifiers for centrality determination in proton-nucleus and nucleus-nucleus collisions. *EPJ Web of Conferences*, 137, 11 2016. [18](#)
- [10] LHCb, 10 2024. [19](#)
- [11] Nitesh Soni. Atlas forward detectors and physics. *arXiv preprint arXiv:1006.5426*, 2010. [20](#), [21](#)

- [12] Wladyslaw Henryk Trzaska, Alice Collaboration, et al. New fast interaction trigger for alice. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 845:463–466, 2017. [20](#)
- [13] The Collaboration, Kjeld Aamodt, Arian Abrahantes, Ricardo Achenbach, S Acounis, Dagmar Adamova, C Adler, M Aggarwal, F Agnese, Gianluca Aglieri Rinella, Zubayer Ahammed, A Ahmad, Nora Ahmad, Shakeel Ahmad, A Akindinov, P Akishin, D Aleksandrov, Borri Alessandro, Romulo Alfaro, and M Zuffa. The alice experiment at the cern lhc. *Journal of Instrumentation*, 3:S08002, 08 2008. [21](#)
- [14] B Abelev, J Adam, D Adamová, AM Adare, MM Aggarwal, G Aglieri Rinella, M Agnello, AG Agocs, A Agostinelli, Z Ahammed, et al. Performance of the alice vzero system. *Journal of Instrumentation*, 8:P10016–P10016, 2013. [21](#)
- [15] Maciej Slupecki. Upgrade of alice forward detectors. In *POS Proceedings of Science*. Sissa, 2019. [21](#)
- [16] Francesca Carnesecchi. Performance of the alice time-of-flight detector at the lhc. *Journal of Instrumentation*, 14(06):C06023, 2019. [21](#)
- [17] Hamamatsu Photonics. *Photomultiplier tubes*. Hamamatsu, 2000. [21](#)
- [18] SAS Promic. rue de la pierre plantée, 42650 saint jean bonnefonds, 46. [21](#)
- [19] VD Kekelidze. Nica project at jinr: status and prospects. *Journal of Instrumentation*, 12(06):C06012, 2017. [22](#)
- [20] Viacheslav Toneev. The nica/mpd project at jinr (dubna). *arXiv preprint arXiv:0709.1459*, 2007. [23](#)
- [21] G Trubnikov, A Butenko, V Golovatyuk, A Guskov, M Kapishin, V Kekelidze, R Lednicky, I Meshkov, and A Sorin. Nica heavy-ion collider at jinr (dubna). status of accelerator complex and first physics at nica. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 2586, page 012013. IOP Publishing, 2023. [24](#)
- [22] Vahagn Abgaryan, R Acevedo Kado, SV Afanasyev, GN Agakishiev, E Alpatov, G Altsybeev, M Alvarado Hernández, SV Andreeva, TV Andreeva, EV Andronov, et al. Status and initial physics performance studies of the mpd experiment at nica. *The European Physical Journal A*, 58(7):140, 2022. [24](#)
- [23] V Golovatyuk, V Kekelidze, V Kolesnikov, O Rogachevsky, and A Sorin. Multi-purpose detector to study heavy-ion collisions at the nica collider. *Nuclear Physics A*, 982:963–966, 2019. [25](#)
- [24] VD Kekelidze, AN Sissakian, AS Sorin, and MPD Collaboration. The multipurpose detector (mpd). In *Very High Multiplicity Physics Workshops*, pages 22–41. World Scientific, 2008. [26](#)

- 
- [25] Hiroaki Ohnishi. Performance of the phenix beam-beam counter (bbc). In *APS Division of Nuclear Physics Meeting Abstracts*, pages DC–009, 2000. 26
- [26] Mauricio Alvarado, Alejandro Ayala, Marco Alberto Ayala-Torres, Wolfgang Bietenholz, Isabel Dominguez, Marcos Fontaine, P. González-Zamora, Luis Manuel Montaña, E. Moreno-Barbosa, Miguel Enrique Patiño Salazar, L.A.P. Moreno, P.A. Nieto-Marín, V.Z. Reyna Ortiz, M. Rodríguez-Cahuantzi, G. Tejeda-Muñoz, Maria Elena Tejeda-Yeomans, A. Villatoro-Tello, and C.H. Zepeda Fernández. A beam–beam monitoring detector for the mpd experiment at nica. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 953:163150, 2020. 26, 27, 34, 61
- [27] Geant Collaboration. Geant4 user’s guide for application developers. *Accessible from the GEANT4 web page [1] Version geant4*, 9, 2012. 30
- [28] Anna Wieczorek. Development of novel plastic scintillators based on polyvinyltoluene for the hybrid j-pet/mr tomograph. *arXiv preprint arXiv:1710.08136*, 2017. 30
- [29] S Korpachev and M Chadeeva. Geant4 simulation of optical photon transport in scintillator tile with direct readout by silicon photomultiplier. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 798, page 012218. IOP Publishing, 2017. 32
- [30] Berkeley Nucleonics Corp. Radioactive Check Sources Alpha, Beta, Gamma and Mixed Isotopes. <https://www.berkeley-nucleonics.com/check-source/>, 2015. 33
- [31] Stanford Environmental Safe. Co-60 Radionuclide Fact Sheet. <https://ehs.stanford.edu/reference/co-60-radionuclide-fact-sheet/>, 2015. 33
- [32] Stanford Environmental Safe. Cs-137 Radionuclide Fact Sheet. <https://ehs.stanford.edu/reference/cs-137-radionuclide-fact-sheet/>, 2015.
- [33] Stanford Environmental Safe. Na-22 Radionuclide Fact Sheet. <https://ehs.stanford.edu/reference/na-22-radionuclide-fact-sheet/>, 2015.
- [34] Stanford Environmental Safe. Sr-90 Radionuclide Fact Sheet. <https://ehs.stanford.edu/reference/sr-90-radionuclide-fact-sheet/>, 2015. 33
- [35] R. Acevedo Kado, M. Alvarado Hernández, A. Ayala, M.A. Ayala Torres, W. Bietenholz, D. Chaires, E. Cuautle, I. Domínguez, A. Guirado, I. Maldonado, J. Maldonado, E. Moreno-Barbosa, P.A. Nieto-Marín, M.E. Patiño Salazar, L.F. Rebolledo, M. Rodríguez-Cahuantzi, D. Rodríguez-Figueroa, V.Z. Reyna-Ortiz, G. Tejeda-Muñoz, M.E. Tejeda-Yeomans, L. Valenzuela-Cázares, and C.H. Zepeda Fernández. The conceptual design of the minibebe detector proposed for nica-mpd. *Journal of Instrumentation*, 16(02):P02002, feb 2021. 34, 61

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [36] CRYSTALS SAINT-GOBAIN. LYSO Scintillfigureation MAterial  $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ , 2017. [43](#)
- [37] CH Zepeda-Fernández, LF Rebolledo-Herrera, M Rodríguez-Cahuantzi, and E Moreno-Barbosa. Electric charge estimation using a sensl sipm. *Journal of Instrumentation*, 15(09):P09008, 2020. [50](#)
- [38] Marco Alberto Ayala-Torres, Lucina Gabriela Espinoza Beltrán, Marcos Aurelio Fontaine Sanchez, Luis A Hernández-Cruz, Luis Manuel Montaña, Braian Adair Maldonado Luna, Eduardo Moreno-Barbosa, Lucio F Rebolledo-Herrera, Mario Rodríguez-Cahuantzi, Valeria Z Reyna-Ortiz, et al. Performance of bebe, a proposed dedicated beam-beam monitoring detector for the mpd-nica experiment at jinr. *Journal of Instrumentation*, 17(09):P09031, 2022. [61](#)