Cálculo de centralidad en las colisiones de iones pesados con el experimento MPD-NICA del JINR

Braian Adair Maldonado Luna

Junio, 2022
Versión: Final

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Cuerpo Académico de Física de las Partículas Elementales

Cálculo de centralidad en las colisiones de iones pesados con el experimento MPD-NICA del JINR

Tesis para obtener el título de maestro en Física Aplicada presentada por

Braian Adair Maldonado Luna

Director de Tesis Dr. Mario Rodríguez Cahuantzi
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Codirectora de Tesis Dra. Lucina Gabriela Espinoza Beltrán
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Universidad Autónoma de Sinaloa

Junio, 2022

Título: Cálculo de centralidad en las colisiones de iones pesados con el experimento MPD-NICA del JINR.
Estudiante: Braian Adair Maldonado Luna.

COMITÉ:

Dr. Arturo Fernández Téllez.
Presidente.

Dr. Mario Iván Martínez Hernández.
Secretario.

Dr. Guillermo Tejeda Muñoz.
Vocal.

Dr. Mario Rodríguez Cahuantzi.
Director de tesis.

Dra. Lucina Gabriela Espinoza Beltrán.
Co-directora de tesis.

Braian Adair Maldonado Luna

Cálculo de centralidad en las colisiones de iones pesados con el experimento MPD-NICA del JINR

Tesis, Junio, 2022

Director de tesis: Dr. Mario Rodríguez Cahuantzi

Co-directora de tesis: Dra. Lucina Gabriela Espinoza Beltrán

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Cuerpo Académico de Física de las Partículas Elementales

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Calle 18 Sur y Avenida San Claudio S/N

72570, Puebla

Resumen

El estudio de las propiedades de la materia nuclear creada en colisiones de iones pesados requiere de un entendimiento profundo de sus características globales como la producción de partículas cargadas en diferentes regiones del espacio fase como función de la centralidad de la colisión para diferentes energías. A través de herramientas de simulación con el método de Monte Carlo en este trabajo se exploran las capacidades del detector propuesto Be-Be para el experimento MPD-NICA del JINR (Dubna, Rusia) en la determinación de la centralidad en colisiones Bi+Bi con energías en el centro de masas de la colisión de 9 GeV.

Keywords- Be-Be, centralidad, multiplicidad, MPD-NICA.

Abstract

The study of the properties of nuclear matter created in heavy ion collisions requires a deep understanding of its global characteristics such as the production of charged particles in different regions of phase space as a function of the centrality of the collision for different energies. Through simulation tools with the Monte Carlo method, this work explores the capabilities of the Be-Be detector proposed for the JINR MPD-NICA experiment (Dubna, Russia) in determining the centrality in Bi+Bi collisions with energies in the center of mass of the 9 GeV collision.

Keywords- Be-Be, centrality, multiplicity, MPD-NICA.

Agradecimientos

Quiero agradecer primero que nada a Dios, que me ha permitido tener salud para poder realizar este trabajo.

También quiero agradecer a mis padres, que conforme crezco, me doy cuenta de la importancia de la educación que me brindaron, siendo la motivación para tener curiosidad y la determinación para resolverla los valores que se convirtieron en los motivos para seguir aprendiendo, en verdad gracias por todo lo que hicieron por mí día a día en mi pueblo para que yo pudiera venir a la ciudad a lograr mi sueño.

Agradecezco también a mi amor Melanie, gracias por brindarme tu cariño y apoyo.

Gracias al Dr. Mario y la Dra. Gabriela quienes fueron unos guías a cada momento de esta tesis, no solo brindándome su tiempo y ayuda para realizar los procesos, sino también por su confianza.

Doy las gracias al Conacyt, institución que me brindó su apoyo para la realización de esta maestría.

A los ciudadanos mexicanos. Por su confianza, ya que gracias a su contribución es posible que muchos estudiantes seguir aprendiendo, espero poder retribuirles muy pronto.

Esta tesis fue escrita con LATEX. Usa el formato Clean Thesis desarrollado por Ricardo Langer. El formato puede ser descargado en http://cleanthesis.der-ric.de/.

Índice general

1 Introducción **1**
1.1 Motivación y declaración de problemas 1

2 Determinación de centralidad mediante el modelo de Glauber **4**
2.1 El modelo de Glauber 5
2.1.1 Enfoque Monte Carlo 8
2.2 El núcleo se encuentra con la Corona 8
2.3 UrQMD 9
2.3.1 Parámetro de impacto base 10
2.4 Clases de centralidad y su relación con cantidades geométricas 10

3 Experimento MPD-NICA y caracterización de Be-Be en MPDroot **13**
3.1 Descripción de MPD-NICA y necesidad de Be-Be 14
3.2 FHCAL, FFD y la importancia de la redundancia de información 15
3.3 Posición del Be-Be y geometría (espesor y más características) 17
3.4 Configuraciones 18
3.5 Transporte BiBi @9GeV, resultados de la primer fase 19
3.5.1 Multiplicidad de partículas cargadas por número de eventos 20
3.5.2 Parámetros de impacto de partículas cargadas por número de eventos 23

4 Resultados **27**
4.1 Optimización para la geometría principal 27
4.1.1 Correlación de centralidad 28
4.1.2 Resolución de centralidad para las distintas configuraciones 31
4.2 Comparación de las geometrías 1.5 vs 1 cm. 37
4.2.1 Configuración a) 37
4.2.2 Configuración e) 38

5 Conclusión **41**
5.1 Resolución y correlación (mejor configuración) 41
5.2 Trabajo a futuro 42

6 Glosario **44**

Bibliografía **46**

A Apéndice **49**
A.1 UrQMD 49
A.2 Proceso para la obtención de la resolución para cada configuración 51
A.3 Macros para estudios de centralidad 51
A.4 Gaussianas 52

Dedicatoria **56**

1 Introducción

> *Toda la física es o bien imposible o trivial. Es imposible hasta que la entiendes, y luego se vuelve trivial.*
>
> **— Ernest Rutherford**
> (Físico británico)

1.1. Motivación y declaración de problemas

El plasma de Quark-gluones (QGP) es un estado de la materia que existió en el universo temprano (10 microsegundos) en el cual los constituyentes de los núcleos están libres, esto es posible en ambientes donde existan condiciones extremas de densidad de energía y temperatura. Existen 2 tipos de transiciones entre dos fases de la materia. Cuando el sistema con un compuesto libera o absorbe energía (por ejemplo, en forma de calor) a temperatura constante las fases del compuesto pueden coexistir, esto significa que algunas partes completaron la transición y otras no. Estas son transiciones de primer orden y un ejemplo de ellas sucede en el punto de ebullición del agua, en donde existe la fase líquida (aún no llega a los 100° C a pesar que se tiene un calor latente actuando sobre el compuesto) y la fase gaseosa que ya ha igualado o superado esa temperatura, todo en condiciones atmosféricas normales. Cuando se tienen transiciones de segundo orden hay transiciones continuas. Esto ocurre a temperaturas y presiones extremadamente altas, la fase gaseosa y líquida es indistinguible.

La centralidad de un evento es una de las principales características de las colisiones entre iones pesados. En colisiones centrales el número de participantes es muy alto y, por lo tanto, se alcanzan densidades muy altas de energía donde se espera la formación de un plasma de quarks y gluones. Para colisiones semicentrales o periféricas, el número de participantes disminuye

respecto a las centrales. Es decir, existe una relación inversa entre la centralidad de la colisión y el número de participantes. Tomando como base al parámetro de impacto de la colisión, la separación relativa entre los centros de los iones, es posible modelar geométricamente la colisión utilizando el modelo de Glauber[21, 8].

Diversos estudios han mostrado que existe una dependencia entre la centralidad de la colisión y la multiplicidad de partículas cargadas en diferentes rangos de pseudorapidez para diferentes sistemas que colisionan [7, 6]. Este tipo de estudios ayudan a la caracterización de los sistemas creados en colisiones (ultra)relativistas de iones pesados.

En la actualidad se está construyendo en el Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Rusia) un colisionador de iones pesados conocido como Nuclotron-based Ion Collider fAcility el cual estudiará las propiedades de la materia nuclear en un rango que no ha sido explorado, colisionando haces de Bismuto en un rango de energías entre 7 y 10 GeV en el centro de masas de la colisión en su primera etapa. Se tiene considerado a 2 experimentos que analizarán los eventos de colisión en NICA, SPD (Spin Physics Detector)[28] y MPD (Multi-Purpose Detector)[24]. Para el experimento MPD el grupo mexicano, MexNICA[17], propuso un detector que servirá como monitor de haz y al mismo tiempo puede ser usado como sistema de disparo y contribuirá a la reconstrucción del plano del evento y la centralidad en colisiones entre iones. Este detector es conocido como Be-Be[18].

En este trabajo de tesis se estudiaron las capacidades del detector propuesto BEBE para la determinación de la centralidad de colisiones entre haces de bismuto y oro a las energías esperadas de NICA. [21, 3, 16, 13, 8, @29, @12, @26, 4, 30, 31, @10, @14, 1, 27, 15, 25, 2, 33, 32, 20, 5, 19, 11, 22]

En el capítulo 2 se abordan los conceptos teóricos que sirven de base para todos los cálculos que se hacen en este trabajo, dando un pequeño contexto de cómo se creó el Modelo de Glauber y explicando las cantidades que se necesitan para poder emplearlo, además se describe su enfoque Monte Carlo, el cual será de suma importancia pues gracias a él se pueden calcular las cantidades geométricas de forma simple. Se habla un poco del modelo core-corona solo para explicar lo que significa una región de traslape en términos de centralidad. Se explica el generador utilizado para simular colisiones. También se introduce el concepto de parámetro de impacto base, el cual será de utilidad en capítulos posteriores. Por último se explica qué son las

clases de centralidad y la manera en la que este trabajo las cuantifica, para así relacionar de forma directa las cantidades geométricas que el modelo obtiene con el concepto de centralidad.

El experimento MPD-NICA se plantea hasta el capítulo 3 que es donde se menciona la necesidad de este y se detalla también la importancia de Be-Be para este experimento utilizando algunos conceptos que ya se han tratado en el capítulo anterior. Se describe el sistema que se empleará para el transporte de partículas incluyendo los detectores que se encenderán junto con el detector Be-Be, además se menciona la importancia de tener información de distintos detectores para una mejor aproximación. Es en este capítulo donde se describe la posición del Be-Be y la determinación de la centralidad con diferentes geometrías, entregando los resultados de una primera fase en donde también se hacen observaciones de los gráficos presentados, en específico acerca de la multiplicidad de partículas y cómo Be-Be las interpreta. Se determinan los intervalos para cada clase de centralidad.

El capítulo 4 es la sección en la cual se presentan al lector los resultados de todo el análisis realizado, en específico se comparan los resultados obtenidos con las diferentes geometrías de Be-Be, destacando la que tiene un espesor de 1 cm. con los anillos 4 y 5 encendidos como la que brinda mejores resultados en los estudios de la correlación entre el parámetro de impacto y multiplicidad, así como en la resolución de centralidad.

Por último en el capítulo 5 se concluye el análisis de todo el trabajo, repitiendo brevemente las ideas expuestas y contestando las preguntas de investigación que surgieron a lo largo del contenido. Además de manifestarse los conocimientos obtenidos de la investigación se plantea el trabajo a futuro que se puede seguir con esta línea de optimización del Be-Be.

Metodología

Es importante mencionar que todo este análisis es a nivel Monte Carlo, es decir, no se pondrá atención en los detalles técnicamente electrónicos del detector Be-Be. Se trabaja con una muestra minimun bias y todo el trabajo se realiza en el ambiente ROOT[@9], siendo el programa MPD-ROOT[@23] la herramienta principal utilizada.

2 Determinación de centralidad mediante el modelo de Glauber

El modelo de Glauber[21] es usado para estudiar la dispersión de partículas compuestas en procesos de colisión a altas energías desde la decada de 1950. Glauber actualizó el trabajo realizado por Moliere[27] en 1940 en experimentos de protones, deuterones y núcleos ligeros. El trabajo de Glauber se volvió interesante cuando en 1967 Czyz y Lesniak[33] observaron la caída en los picos elásticos para protones incidentes en deuterones cuya posición y magnitud fueron predichas por la teoría de Glauber, poniendo así la teoría cuántica de colisiones de cuerpos compuestos sobre una base firme.

En 1969 Maximon y Czyz[32] aplicaron la teoría en colisiones elásticas para p+A y A+B, finalmente Bialas, Bleszynski y Czyz la extendieron a colisiones nucleares inelásticas después de haber aplicado su "modelo de nucleón herido" a las colisiones de nucleos de hadrones[2]. En la decada de 1970 el modelo de Glauber cobró relevancia al descubrirse que tenía utilidad en la descripción de las secciones transversales para las cuales las relaciones de factorización fueron encontradas, por ejemplo, $\sigma_{AB}^2 \sim \sigma_{AA}\sigma_{BB}$, es decir, el cuadrado de la sección transversal de los proyectiles A y B σ_{AB}^2 es proporcional a la sección transversal de A y A multiplicada por la sección transversal de B y B. El "límite óptico"[11] es la característica del modelo original de Glauber que permite que la integral de dispersión múltiple completa sea númericamente tratable, posteriormente con el enfoque de Bialas se introdujeron funciones más modernas como la función de espesor y un prototipo de superposición nuclear T_{AB}.

El enfoque de "Glauber Monte Carlo" (GMC)[15] apareció de manera natural con la llegada de las computadoras de escritorio usando códigos de producción de partículas más realistas. La idea es de disponer de dos núcleos proyectados en el plano x-y y con un parámetro de impacto aleatorio, modelados con nucleones no correlacionados muestreados a partir de distribuciones de densidad medidas.

El GMC se aplicó por primera vez en el modelo HIJET[15] y ha aparecido en los modelos que requieren puntos de producción específicos para los subprocesos en un colisión A+A, como HIJIN[21].

2.1. El modelo de Glauber

El trabajo de Glauber es un modelo geométrico para colisiones entre iones y a pesar de que se sabe que estas colisiones consideran interacciones más complejas, para fines prácticos es muy útil. La idea de este modelo es considerar a dos núcleos proyectados en el plano x-y y tratar cada colisión binaria como independiente, es decir, que una colisión no afecte a la siguiente y para cada colisión existirá un parámetro de impacto aleatorio que dependiendo de su magnitud creará más o menos partículas cargadas.

Para realizar los cálculos de parámetros geométricos de Glauber son necesarias cantidades físicas que se miden en otros experimentos y las principales son[21]:

- Densidades de carga nuclear medidas en experimentos de electrones a bajas energías.
- Dependencia energética de la sección transversal nucleón-nucleón inelástica.

La densidad de carga nuclear es usualmente parametrizada por la distribución de Fermi con tres parámetros[32]:

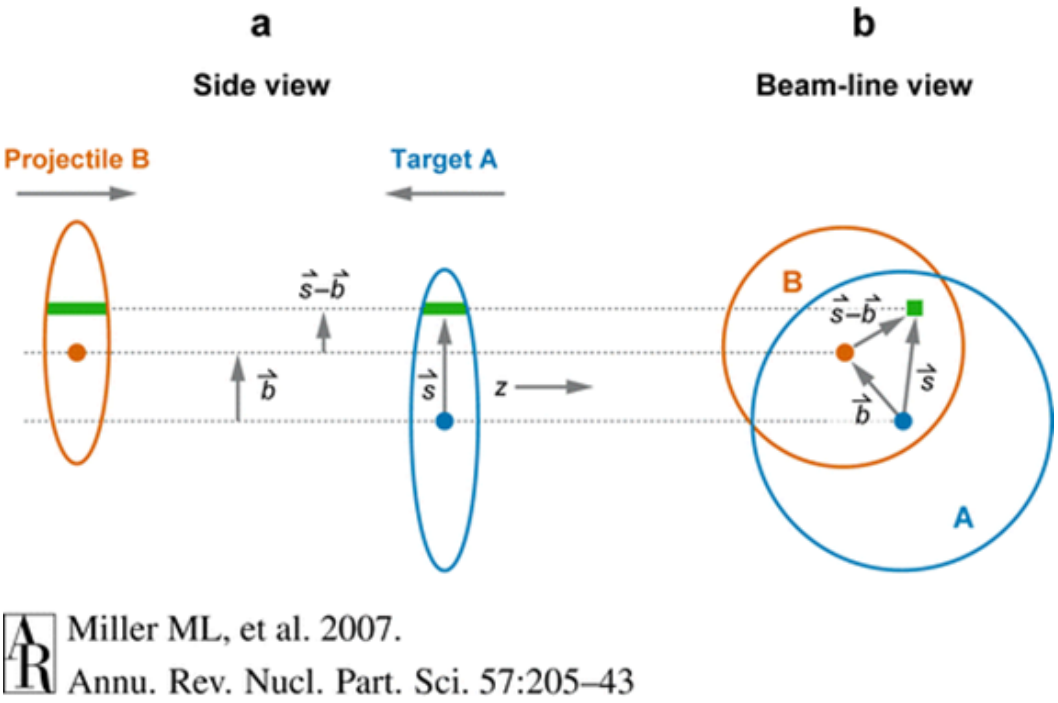
$$\rho(r) = \rho_0 \cdot \frac{1 + w(\frac{r}{R})^2}{1 + exp(\frac{r-R}{a})} \tag{2.1}$$

donde ρ_0 corresponde a la densidad del nucleón en el centro del núcleo, R al radio nuclear, a a la "profundidad de la piel" y w caracteriza desviaciones de una esfera.

Como existe una pequeña transferencia de movimiento en procesos que involucran a la sección transversal, es imposible calcular los procesos de multipartículas nucleón-nucleón utilizando cromodinámica cuántica. Es necesario tomar a la sección transversal nucleón-nucleón inelástica σ_{inel}^{NN} como entrada y esta proporciona la única dependencia no trivial de la energía del

haz, para una explicación más amplia de las condiciones de este modelo, véase [21].

En la Fig. 2.1 se tiene un esquema de los parámetros geométricos a considerar para poder realizar los cálculos de Glauber, primero se tiene que entender que el proyectil B y el objetivo A viajan en paralelo al eje z y chocan a velocidades relativistas con un parámetro de impacto $\vec{b}$ que es la distancia entre los centros de los núcleos, existen dos tubos de flujo, uno parametrizado por $\vec{s}$ respecto al centro del objetivo y otro por $\vec{s}-\vec{b}$ respecto al centro del proyectil, estos dos tubos se superpondrán en la colisión. La probabilidad por unidad de área transversal de que un nucleón se encuentre en el tubo de flujo del objetivo es $\hat{T}_A(\vec{s}) = \int \hat{\rho}(\vec{s}, z_A)\mathrm{d}z_A$ donde $\hat{\rho}_A(\vec{s}, z_A)$ es la probabilidad normalizada de encontrar al nucleón en la ubicación $(\vec{s}, z_A)$[21].



Miller ML, et al. 2007.
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 57:205–43

Fig. 2.1.: Esquema del modelo de Glauber[21].

Con esta idea se conceptualiza la "función de espesor" al integrar sobre todos los valores de $\vec{s}$ el producto de las probabilidades de que un nucleón se encuentre en cada uno de los dos tubos por la diferencial de área, es decir, el área de superposición para la cual un nucleón en A pueda interactuar con uno en B, y queda:

$$\hat{T}_{AB}(\vec{b}) = \int \hat{T}_A(\vec{s})\hat{T}_B(\vec{s}-\vec{b})\mathrm{d}^2 s \tag{2.2}$$

Es aquí donde se requiere la sección eficaz inelástica pues la probabilidad de que una interacción ocurra es $\hat{T}(\vec{b})\sigma_{inel}^{NN}$, utilizando la distribución binomial se procede a calcular la probabilidad de tener n interacciones entre el núcleo A (con A nucleones) y el núcleo B (con B nucleones).

$$P(n,\vec{b}) = \binom{AB}{n}\left[\hat{T}_{AB}(\vec{b})\sigma_{inel}^{NN}\right]^n\left[1-\hat{T}_{AB}(\vec{b})\sigma_{inel}^{NN}\right]^{AB-n} \tag{2.3}$$

donde el primer termino es el número de combinaciones para encontrar n colisiones de AB posibles, el segundo la probabilidad de tener exactamente n colisiones y el último el de tener AB-n fallas. Suponiendo que el núcleo no está polarizado (que son las condiciones que se establecen en NICA) se llega a la expresión del número de participantes N_{part}.

$$\begin{aligned} N_{part}(\vec{b}) = A\int \hat{T}_A(\vec{s})\left\{1-\left[1-\hat{T}_B(\vec{s}-\vec{b})\sigma_{inel}^{NN}\right]^B\right\}\mathrm{d}^2 s + \\ B\int \hat{T}_B(\vec{s}-\vec{b})\left\{1-\left[1-\hat{T}_a(\vec{s})\sigma_{inel}^{NN}\right]^A\right\}\mathrm{d}^2 s \end{aligned} \tag{2.4}$$

Es en este cálculo donde se puede observar que el número de participantes está en función del parámetro de impacto en la colisión, así mismo se puede obtener la expresión para el número de espectadores N_{esp} normalizando los datos.

$$N_{esp} = 1 - N_{part} \tag{2.5}$$

La forma óptica de la teoría de Glauber se basa en distribuciones continuas de densidad de nucleones, caso distinto a la formulación Monte Carlo en donde localiza a los nucleones en coordenadas específicas.

2.1.1. Enfoque Monte Carlo

El enfoque Monte Carlo tiene la gran virtud de ser simple para el cálculo de cantidades relacionadas a la geometría como N_{part} y N_{coll} y es de suma importancia para este trabajo debido a su capacidad de simular cantidades observables experimentalmente como la multiplicidad de partículas cargadas que será utilizada en el siguiente capítulo para obtener los primeros resultados que permitan realizar análisis en cortes de centralidad similares a datos reales.

Para este enfoque se disponen los nucleones A del núcleo A en un sistema de coordenadas tridimensional de acuerdo con su distribución de densidad, de la misma forma se considera para el núcleo B y se trata la colisión como una secuencia de colisiones binarias en los nucleones de manera independiente, es decir, la σ_{inel}^{NN} es independiente del número de colisiones que haya sufrido un nucleón antes extrayendo un parámetro de impacto aleatorio b de la distribución $\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}b} = 2\pi b$. Es importante mencionar que en la versión más simple del GMC se produce una colisión si $d < \sqrt{\sigma_{inel}^{NN}/\pi}$.

2.2. El núcleo se encuentra con la Corona

Para tener una mayor idea de lo que son las partículas espectadoras y participantes se presenta un concepto que caracteriza a las colisiones de forma muy ilustrativa al introducir una corona y el centro de una colisión entre dos núcleos.

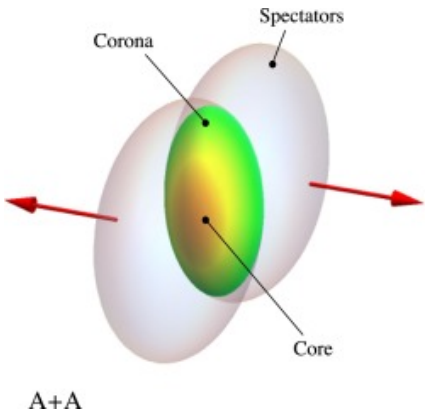


Fig. 2.2.: Ilustración de una colisión no central[4].

En la Fig. 2.2 se muestra una imagen de una colisión no central que presenta todos los factores a considerar al hacer la clasificación de clases de centralidad, el "Core" es el centro del sistema y donde se espera que se forme el QGP, luego la "Corona" es el área donde es posible una colisión pero con una menor probabilidad así que las partículas que se creen ahí serán producidas por n + n reacciones y por último se ilustra a las partículas espectadoras que no tienen probabilidad de colisionar ya que no hay un traslape entre núcleos.

En [4] se explica con detalle que a medida que la energía de la colisión disminuye la polarización $\bar{\Lambda}$ aumenta más abruptamente que la polarización Λ. Para este trabajo no se consideró la polarización en los haces, pero es imperativo mencionar esta información pues paralelo al MPD en NICA se está creando también el SPD, experimento en el cual se usarán haces polarizados y a pesar de que los cálculos son un poco distintos debido a la consideración que se tomó en 2.1 (que el núcleo no está polarizado) el rango en el que trabajará NICA (bajas energías) vuelve muy interesante este experimento.

2.3. UrQMD

Los aceleradores creados recientemente ofrecen la posibilidad de estudiar la creación de partículas mediante el enfriamiento del QGP y procesos n + n en colisiones, en grandes intervalos de energía.

Actualmente existen muchos modelos, desde teóricos hasta Monte Carlo, que consideran distintos conceptos y características, una de ellas es el rango de energía en el que se pueden aplicar. Se pueden categorizar según la etapa de la colisión que estudien ya sea modelos de estados iniciales, como el de Glauber, de interacciones partónicas o modelos de expansión dinámica, cada uno siguiendo su enfoque como puede ser la cromodinámica cuántica o los fenómenos colectivos. El modelo híbrido puede incluir 2 o más etapas, siendo el más realista.

Para este trabajo el generador que se empleó fue UrQMD[25] ("Dinámica Cuántica Molecular ultra-Relativista", por sus siglas en inglés) que es un modelo microscópico multipropósito para estudiar efectos de iones pesados desde la multifragmentación y el flujo colectivo de partículas hasta la producción y correlaciones de partículas con soluciones Monte Carlo de una

gran cantidad de ecuaciones parciales acopladas integral-diferenciales para el tiempo de evolución de varias densidades del espacio fase. Los rangos de energía para este simulador son de 2-200 GeV[22] y cada rango tiene su propia metodología, <5 GeV considera sus resonancias y >5GeV domina la fragmentación en hadrones, utilizando parámetros desconocidos establecidos por experimentos. Cabe destacar que este modelo es congruente con muchos datos experimentales[20] y el rango de energía con el que trabaja permite simular condiciones similares al experimento MPD-NICA.

En la simulación se tiene control de las variables involucradas en un sistema, como el tipo de núcleos a colisionar, la energía, el rango de parámetro de impacto y el número de eventos. Para este trabajo se simularon 1,000,000 de eventos, los núcleos a colisionar fueron Bismuto-Bismuto en su forma más estable (Bismuto-209), con un b = -15.9 fm. (minimun bias) y a una energía de 9 GeV. En el anexo se muestra el script generador que se corrió en el ambiente Root y que exportó un archivo de salida para el tratado del transporte que se explicará en el siguiente capítulo.

2.3.1. Parámetro de impacto base

Existe una cantidad denominada parámetro de impacto base b_{base} la cual se calcula para cada colisión que simula UrQMD o cualquier generador y es precisamente el parámetro de impacto real, es decir, el que el generador utiliza para todos sus cálculos. Se sabe que este b_{base} irá cambiando para cada evento de forma aleatoria, pero es una cantidad conocida y que se guarda en el archivo de salida de esta simulación, que será de vital importancia para los análisis posteriores siendo pieza fundamental para llegar a un resultado.

2.4. Clases de centralidad y su relación con cantidades geométricas

La centralidad es una propiedad de las colisiones asociada al traslape de los núcleos involucrados y se puede calcular a través de observables medidas por el detector. Se ha estudiado ya el modelo con el cual se harán los cálculos para el detector Be-Be y el generador que se utiliza para la producción de

partículas, estos son los medios que este trabajo usa para obtener la relación entre la multiplicidad y el parámetro de impacto.

Es importante mencionar que la centralidad se expresa como porcentaje de la sección transversal de interacción nuclear total [13]. Para hacer un análisis de centralidad en colisiones de A + A con parámetro de impacto b es conveniente segmentar el espectro de la sección transversal en clases de centralidad c y estas se definen integrando la distribución de b de la siguiente forma:

$$c = \frac{\int_0^b \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}b'}\mathrm{d}b'}{\int_0^{b_{max}} \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}b'}\mathrm{d}b'} = \frac{1}{\sigma_{AA}} \int_0^b \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}b'}\mathrm{d}b' \tag{2.6}$$

Es necesaria una buena determinación de σ_{AA} y establecer una relación entre el parámetro de impacto con alguna observable que mida el detector, en este caso la multiplicidad N y así pueda clasificarse de acuerdo a la fracción de la sección transversal correspondiente:

$$c \approx \frac{1}{\sigma_{AA}} \int_{N_{thr}}^{N_{max}} \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}N}\mathrm{d}N \tag{2.7}$$

en donde N_{thr} es el valor más bajo y N_{max} el valor máximo de la multiplicidad para una clase dada. Los percentiles de sección transversal hadrónica pueder ser determinados para cualquier valor de multiplicidad medida por el detector como se muestra en [13].

Para determinar los valores medios de las cantidades geométricas en las colisiones se necesitan las distribuciones de multipilcidad medidas y simuladas y así se hace el mapeo para cada clase, es decir, se calcula la integral para las distribuciones de multiplicidad y se definen las clases de centralidad en términos de las fracción total de la integral. Para definir cada clase de centralidad es necesario calcular los límites de esta, por ejemplo, la clase 10-20 se define por n_{10} y n_{20} que satisface: (la integración se realiza típicamente desde los valores grandes de N hasta los pequeños)

$$\frac{\int_{N_{max}}^{10} \frac{\mathrm{d}N_{ev}}{\mathrm{d}N}\mathrm{d}N}{\int_{N_{max}}^{0} \frac{\mathrm{d}N_{ev}}{\mathrm{d}N}\mathrm{d}N} = 0{,}1$$

y

$$\frac{\int_{N_{max}}^{20} \frac{\mathrm{d}N_{ev}}{\mathrm{d}N}\mathrm{d}N}{\int_{N_{max}}^{0} \frac{\mathrm{d}N_{ev}}{\mathrm{d}N}\mathrm{d}N} = 0{,}2$$

en general:

$$\frac{\int_{N_{max}}^{n_i} \frac{\mathrm{d}N_{ev}}{\mathrm{d}N}\mathrm{d}N}{\int_{N_{max}}^{0} \frac{\mathrm{d}N_{ev}}{\mathrm{d}N}\mathrm{d}N} = c_m \tag{2.8}$$

de aquí es donde surge la necesidad del detector Be-Be pues reconstruye las distribuciones de multiplicidad con ayuda de la teoría de Glauber y en conjunto con UrQMD recolectan los datos necesarios para este análisis.

En conclusión, si se tiene una distribución de multiplicidad de partículas cargadas determinada evento por evento $\frac{\mathrm{d}N_{ev}}{\mathrm{d}N}$ y la integral total de la distribución es conocida, la centralidad se determina dividiendo dicha distribución en distintas clases de multiplicidad (comunmente llamadas clases de centralidad) correspondientes a una fracción total de partículas.

3

Experimento MPD-NICA y caracterización de Be-Be en MPDroot

El colisionador NICA es un ciclotrón con una circunferencia de 500 metros. Será capaz de acelerar y colisionar haces de protones e iones pesados, incluidos iones de oro relativamente masivos[@29]. La construcción que inicialmente estaba programada para terminar en 2016, se llevará a cabo en 2022 y 2023.

El Nuclotrón que se utilizará en NICA es el primer sincotrón del mundo basado en electroimanes de ciclo rápido del tipo "marco de ventana" con bobina superconductora.

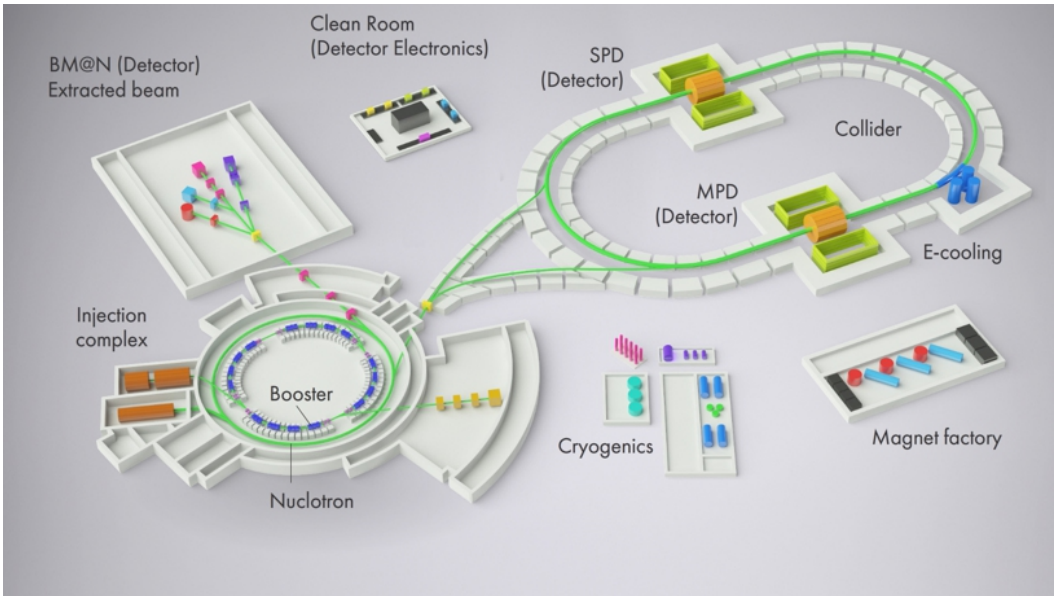


Fig. 3.1.: Esquema de la construcción de NICA[@12].

13

3.1. Descripción de MPD-NICA y necesidad de Be-Be

El proyecto del detector multipropósito[24] (MPD, por sus siglas en inglés) NICA, está enfocado en el estudio de las propiedades de la materia hadrónica producida en las colisiones de iones pesados relativistas todo en un rango de energía de $\sqrt{S_{NN}} = 4 - 11$ GeV[16].

Es clave reconocer la importancia de los distintos sistemas que se pueden crear en un colisionador de iones pesados con base en su centralidad, ya que dependiendo de esta clasificación se puede separar de manera más organizada los eventos, es decir, en colisiones más centrales está presente la materia hadrónica con densidades más altas que puede surgir a una energía dada. La clasificación de eventos de centralidad no es algo tan sencillo como marcar un intervalo de centrales y otro de periféricos, pero afortunadamente se puede cuantificar y esto termina siendo muy útil para la medición de observables realizada por muchos experimentos. De aquí nace una de las necesidades para implementar Be-Be. En el experimento NA-49 (SPS,CERN) la centralidad fue determinada por el calorímetro "zero-degree", en cambio en el experimento Star (RHIC)[21] fue determinada por la multiplicidad de producción de partículas cargadas medida por el número de trazas de la TPC y en el experimento PHENIX (RHIC) se utilizaron ambos criterios. Be-Be es un detector de tipo forward que fue propuesto con la finalidad de cumplir tres tareas: la primera es servir como un detector de disparo, la segunda es contribuir a la reconstrucción del plano del evento y la última es estimar la centralidad de la colisión. El sistema de disparo permite discriminar rápidamente información buscando conservar los datos más interesantes que pueden suceder, esto debido a que en las colisiones se recolecta demasiada información y es imposible almacenarla toda. Esta práctica se vuelve muy compleja por eso se han establecido distintos niveles de disparo para llevar un proceso de filtrado con el fin de tener el mejor resultado, comenzando a nivel de hardware en un filtro un poco rústico e inmediato para después de un tratamiento llevarlo a uno más sofisticado de tipo software donde existe un algoritmo responsable de optimizar los criterios. Una idea fundamental del disparo es aprovechar la simetría del experimento para omitir información equivalente obtenida por distintos detectores. Para conseguir esto Be-Be debe cumplir con una resolución temporal, aunque en esta tesis no se abordará

este tema ni tampoco la resolución del plano de evento. El objetivo de este trabajo es el estudio de la centralidad, cabe resaltar que Be-Be no es el único detector enfocado en este objetivo, existe también el FHCAL[31] y el FFD[30] que son de tipo forward y pretenden complementarse para tener cierta redundancia de información y así poder extrapolar conclusiones en un trabajo en conjunto, es decir, entre más estadística mejor.

3.2. FHCAL, FFD y la importancia de la redundancia de información

La medición de la centralidad se puede realizar con partículas participantes o espectadoras de núcleos en una colisión. Como se mencionó en la sección anterior es necesario considerar otros detectores activos en el sistema que se propone, en esta se pretende dar una idea de cómo trabajan, algunos datos de su eficiencia recopilados de otros estudios y cómo pueden complementarse con lo que el detector Be-Be arroje.

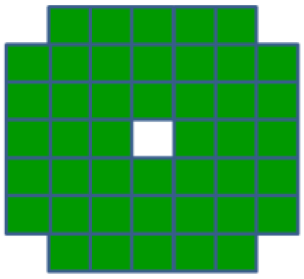


Fig. 3.2.: Esquema de FHCal[31].

El FHCAL es un calorímetro de hadrones posicionado en la parte frontal del experimento que reconstruye la energía depositada por las partículas involucradas en la colisión, por lo que también existe cierto ruido en los estudios de este detector. El proposito de FHCAL es estimar la geometría de la colisión, es decir, la centralidad y orientación del plano del evento. Así como el número de partículas participantes se puede estimar con la multiplicidad de partículas cargadas, el número de espectadores se mide por los calorímetros hadrónicos frontales colocados cerca del haz de luz [31], FHCAL consiste en dos piezas de 44 modulos individuales colocadas simétricamente en lados opuestos de la

colisión y sus dos principales características son la segmentación transversal fina y los orificios del haz en el centro de los calorímetros. Sin embargo tiene un gran problema en la medición de centralidad y es que los fragmentos con pequeños momentos transversales de los núcleos que interactúan, se filtran por el orificio central del haz, siendo especialmente significativa para las colisiones periféricas.

El detector frontal rápido (FFD por sus siglas en ingles) tiene como objetivo la producción de señales de alta velocidad que sirven para el sistema L0-trigger con la selección de colisiones de núcleos que ocurren cerca del punto de interacción y para la generación de un pulso de inicio preciso para activar el detector (TOF), además de producir una señal de pseudovértice mediante la identificación rápida de la posición z de la colisión a lo largo de la línea del haz con una precisión mejor que ±1,5 cm., todo esto con una resolución temporal menor a 30 ps [30].

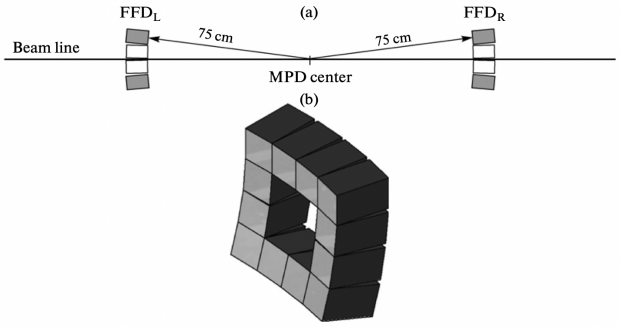


Fig. 3.3.: Esquema del FFD[30].

Se menciona a estos dos detectores en específico debido a que como Be-Be también están colocados en la parte “forward” del experimento y tienen funciones en común con Be-Be, la importancia de considerar a estos dos detectores activos es grande pero más grande es trabajar en conjunto con los datos que cada uno arroja. Aunque en este trabajo se enfatiza en el estudio de la centralidad, se sabe que el detector Be-Be también funcionará como sistema de disparo y para brindar información sobre la resolución del plano del evento en donde se puede suplementar con FFD. Por otro lado, por supuesto se debe tener información de otro detector que interesantemente trabaja distinto, el FHCAL, para eliminar el ruido que cada detector tiene. Además se sabe que FHCAL presenta problemas para las colisiones periféricas y más adelante se demostrará que Be-Be funciona muy bien para esos rangos complementándose con todo el sistema.

3.3. Posición del Be-Be y geometría (espesor y más características)

Anteriormente existía una propuesta de un detector denominado BDM, el Be-Be es una propuesta hecha por la colaboración MexNICA en sustitución de este detector pero con consideraciones propias. Como se ha mencionado el detector Be-Be es de tipo forward, es decir, está colocado paralelamente al plano del evento. Be-Be consta de dos matrices ubicadas a dos metros del punto de interacción. En la siguiente imagen se muestra la posición de Be-Be en MPD.

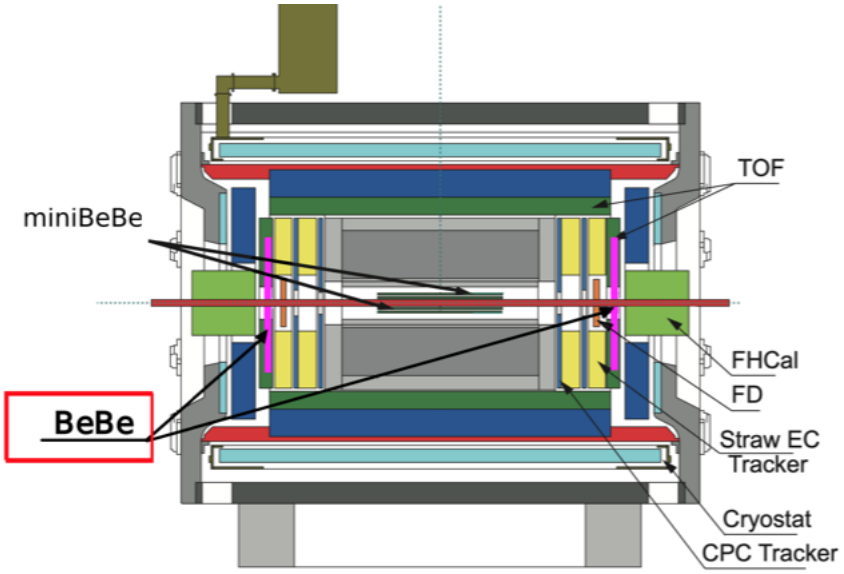


Fig. 3.4.: Posición de Be-Be en el MPD-NICA.

En el experimento RHIC se optó por utilizar una geometría hexagonal para su detector de tipo forward, con Be-Be se propone utilizar una geometría similar al V0 de Alice[5], conformando cada matriz con 5 anillos de 16 celdas cada uno, un diámetro total de 152 cm. dejando un círculo con radio de 5.1 cm. hueco en el centro para que por ahí pase el haz de bismuto y tiene un espesor de 1cm., aunque también existe un estudio con un espesor de 1.5 cm. el cual se utilizará para comparar el aprovechamiento de cada uno con el fin de perder la menor multiplicidad posible y así buscar la configuración optima para el sistema. Todas estas geometrías fueron desarrolladas por el programa Geant y para más información de su programación se puede revisar en [@26].

En la siguiente figura se muestra un esquema que ilustra la geometría del detector.

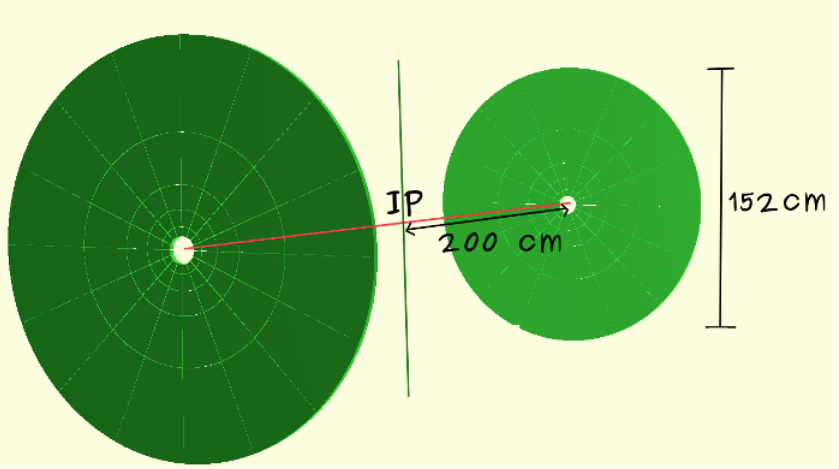


Fig. 3.5.: Geometría del Be-Be.

3.4. Configuraciones

En este trabajo se tiene un objetivo en concreto y es obtener la mejor resolución de centralidad para cada clase de centralidad tratando de linealizar la relación entre el parámetro de impacto y la multiplicidad de partículas cargadas, para lograrlo se han propuesto una lista de configuraciones del Be-Be para optimizar la multiplicidad captada sin que afecte esta linealidad por el ruido que puedan generar partículas que no colisionan N_{esp}, enseguida se enlista las configuraciones consideradas y se presenta un esquema que las ilustra.

Proceso: **BiBi@9GeV, UrQMD** Número de eventos: **1,000,000** Detectores en el transporte: **Mbb+FFD+Be-Be** Detector BeBe con 5 anillos y 16 celdas por anillo, espesor de 1 cm.
Configuraciones
a) Anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos
b) Anillos 1, 2 y 3 encendidos
c) Anillos 1, 2, 3 y 4 encendidos
d) Anillos 2, 3, 4 y 5 encendidos
e) Anillos 3, 4 y 5 encendidos
f) Anillos 4 y 5 encendidos

Tab. 3.1.: Lista de configuraciones.

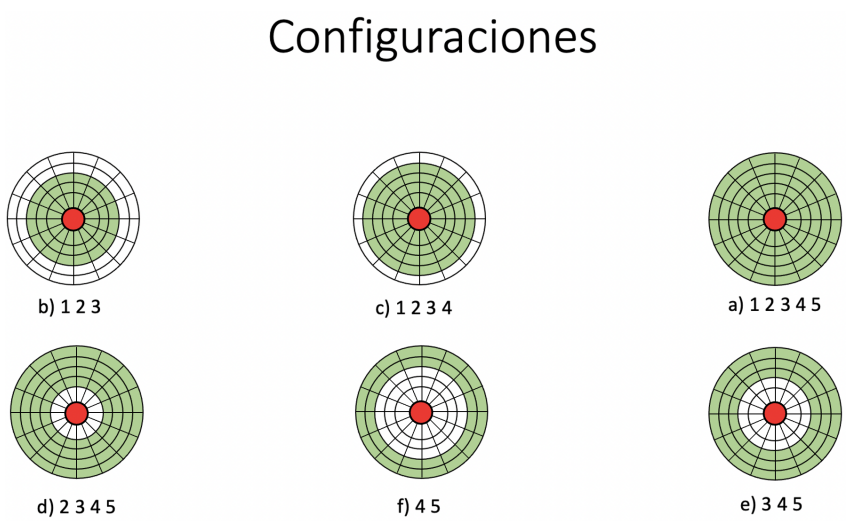


Fig. 3.6.: Esquema de configuraciones.

3.5. Transporte BiBi @9GeV, resultados de la primer fase

En la Fig. 3.7 se muestra un esquema del proceso que se realizó en este trabajo para obtener la información y luego tratarla para obtener resultados, de ahí en adelante se muestra la información adquirida.

Para este trabajo y como se observa en la tabla 3.1 se utilizó el programa UrQMD generando una muestra *minimum bias* de bismuto-bismuto a una energía en el centro de masa de 9 GeV, con un parámetro de impacto aleatorio delimitado por 15.9 fm que asegurará al menos una colisión. El bismuto

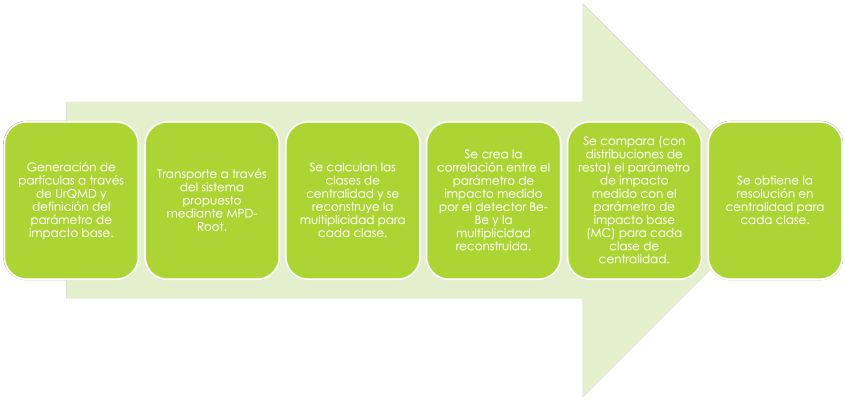


Fig. 3.7.: Esquema del proceso realizado.

utilizado en la simulación fue el bismuto-209 que es el isotópo "virtualmente estable", es decir, tiene el periodo de desintegración más largo que cualquier radioisótopo que experimente decaimiento α y cuenta con una masa de 208.98 uma.

Para que este trabajo sea de utilidad se consideraron además de Be-Be otros detectores, debido a que también interaccionarán con la materia, en este caso específico se usaron a los detectores FFD, Mbb[19] y FHCAL para el transporte de partículas a través del colisionador. Las geometrías que se utilizaron también fueron desarrolladas por el programa geant.

Al ir trabajando con estas muestras se notó que es necesaria demasiada estadística para poder tener resultados confiables, con ayuda del clúster que proporciona el grupo MexNICA se logró realizar el transporte para una estadística total de 1,000,000 de eventos y así poder analizarlos en clases de centralidad y multiplicidad de partículas. Es necesario llevar a cabo este proceso para obtener resultados que serán utiles en el análisis de la resolución de centralidad que se revisará en el siguiente capítulo.

3.5.1. Multiplicidad de partículas cargadas por número de eventos

Con base en lo explicado en el capítulo 2, se reconstruyen las partículas cargadas por el número de eventos y se presentan en los siguientes gráficos, para un análisis más fluido pero no menos detallado se presentan los resultados de solo algunas configuraciones, aunque no fueron los únicas estudiadas.

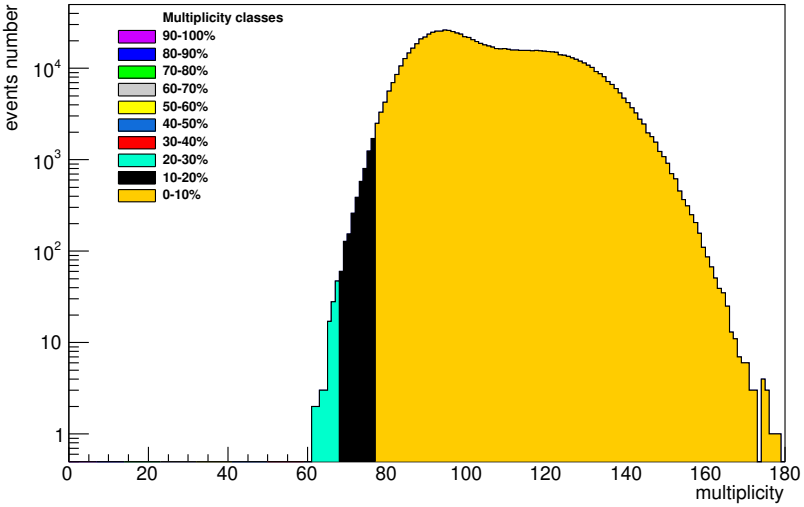


Fig. 3.8.: Partículas cargadas por número de eventos: configuración a). Anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos.

Como primer gráfico se tiene a la configuración con todos los anillos encendidos y aunque sugiere que para colisiones centrales existe mucha multiplicidad, pero para muchos eventos periféricos no, debido a que no aparecen las clases de centralidad periféricas, el estudio no se limita a presentar estos datos sino también a comparar con las otras configuraciones para conocer más acerca de la física del detector.

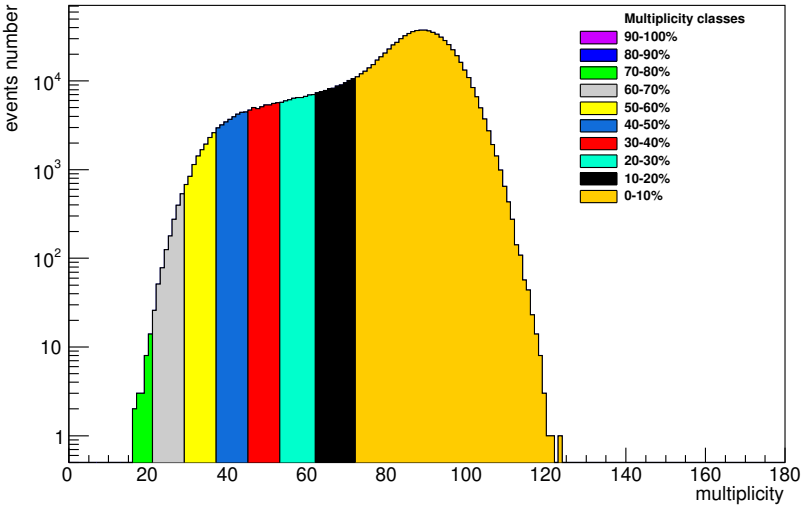


Fig. 3.9.: Partículas cargadas por número de eventos: configuración b). Anillos 1, 2 y 3 encendidos.

Para el análisis de la Fig. 3.8 hay que entender un concepto y es que al desactivar dos anillos el detector capta menos información, uno de los objetivos es también entender al Be-Be y su funcionamiento por lo que se puede observar que al medir menos partículas cargadas éste interpreta que existen colisiones periféricas, ya que en ese tipo de colisiones sucede eso, dicho de otra forma, considera más clases de centralidad en colisiones periféricas. Además se observa un comportamiento que confirma lo esperado, pues considerando que los anillos desactivados son los 4 y 5 siendo estos los más externos, no existe una mejoría en los datos obtenidos, por lo que sugiere que el problema son los anillos más centrales y esta es la importancia de explorar tantas configuraciones. Dos conclusiones muy importantes para los resultados posteriores.

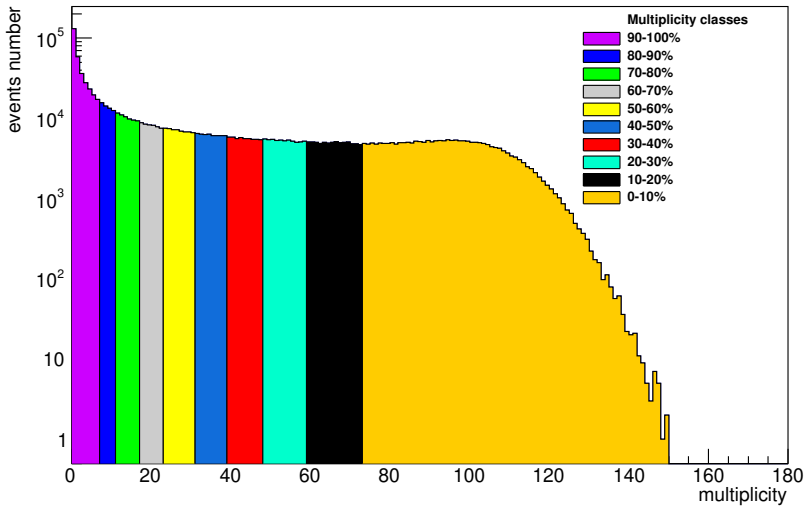


Fig. 3.10.: Partículas cargadas por número de eventos: configuración e). Anillos 3, 4 y 5 encendidos.

Para la configuración e) se tiene una relación interesante, debido a que se puede observar que al haber muchos eventos, la clase de centralidad 90-100 llega a tener multiplicidades aunque en menores cantidades que otras clases, se interpreta como que en colisiones muy periféricas existe multiplicidad pero muy baja como es de esperarse, mientras que para la clase de centralidad 0-10 se ve que con menor cantidad de eventos existe mucha más multiplicidad de partículas, lo relevante en estos gráficos es que se cuantifica esta información y todo es gracias a Be-Be, cálculo de mucha relevancia para cualquier clase de estudio.

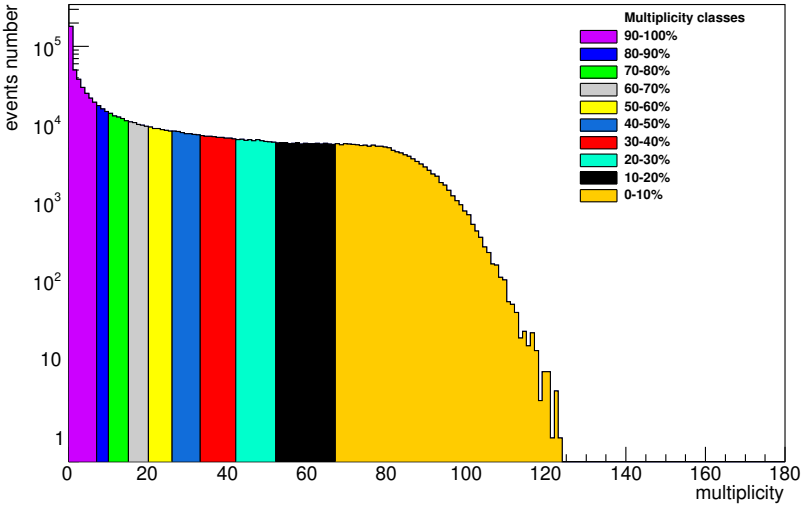


Fig. 3.11.: Partículas cargadas por número de eventos: configuración f). Anillos 4 y 5 encendidos.

Por último en la Fig. 3.11 se aprecia algo similar a la Fig. 3.10 con la mínima diferencia de que disminuye un poco los intervalos de multiplicidad para cada clase de centralidad, es decir, capta menos partículas de manera equitativa lo cual sugiere que al desactivar el anillo 3 se tiene una muestra que representa lo mismo pero con menos datos que procesar, en el siguiente capítulo se verá qué configuración es la más oportuna para tomar.

3.5.2. Parámetros de impacto de partículas cargadas por número de eventos

En esta sección se muestran las clases de centralidad para este transporte en específico, asígnandole un intervalo en el parámetro de impacto a cada una y referenciando cuántos eventos fueron necesarios para poder determinarlas. Se ha estudiado ya lo que son las clases de centralidad, pero cabe recalcar que su cálculo no es un proceso sencillo ya que no se hace de forma lineal, por eso cada intervalo tiene su propia magnitud.

Analizando la configuración a), se observa una clase de centralidad de 0-10 mayor que cualquier otra, es decir, considera un intervalo muy grande para las colisiones frontales, siguiendo esta premisa y en conjunto con el resultado de la Fig. 3.8 se tendrá mucha multiplicidad aunque el parámetro de impacto

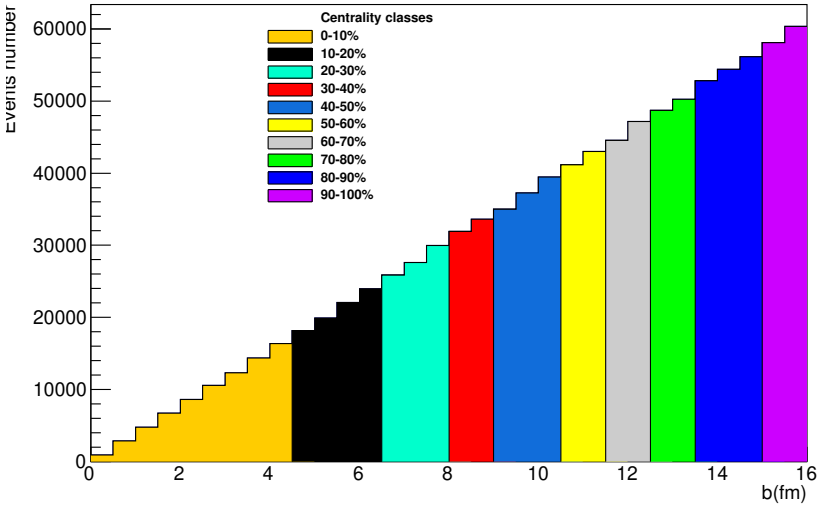


Fig. 3.12.: Parámetro de impacto por número de eventos: configuración a). Anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos.

no sea tan pequeño, sin embargo este trabajo busca encontrar el mejor rendimiento del detector Be-Be y para eso es necesario hacer comparaciones con las otras configuraciones además de los resultados del siguiente capítulo.

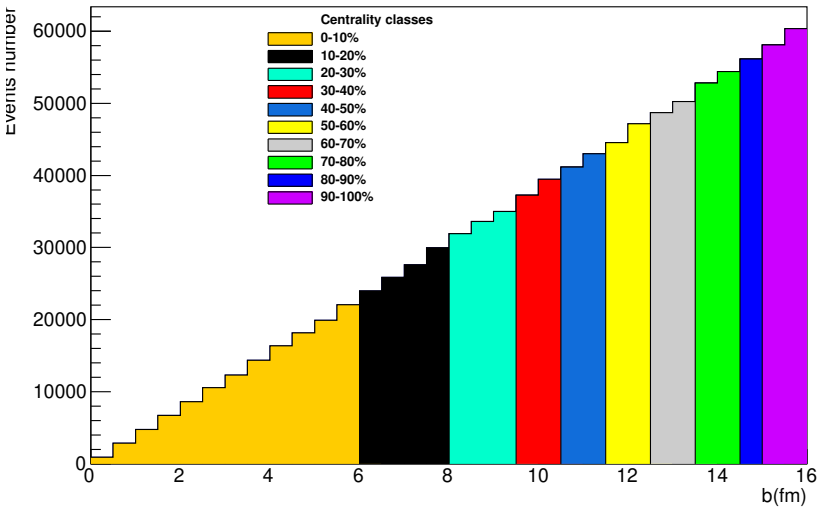


Fig. 3.13.: Parámetro de impacto por número de eventos: configuración b). Anillos 1, 2 y 3 encendidos.

Cuando se apagan los anillos 4 y 5 y se vuelve a hacer el análisis del detector, se puede notar un incremento en la clase de centralidad 0-10 dando a entender que se tiene mucha multiplicidad ahora en un rango de traslape

mayor, es decir, las colisiones frontales son posibles en un intervarlo más grande. Si se utiliza este concepto y se complementa con lo obtenido en la Fig. 3.9 da como resultado que cuando el rango de centralidad para colisiones frontales es muy grande, permite que haya más colisiones periféricas dando como resultado multiplicidades para clases de centralidad mayores, o dicho de otro modo más periféricas.

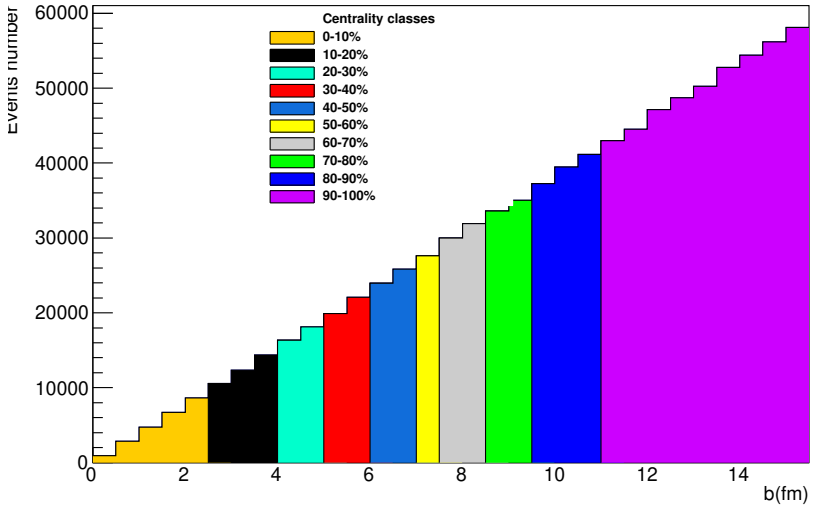


Fig. 3.14.: Parámetro de impacto por número de eventos: configuración e). Anillos 3, 4 y 5 encendidos.

En la Fig. 3.14 se aprecia otra distribución para las clases de centralidad dándole mayor protagonismo a la clase 90-100 o bien las colisiones periféricas, resultado muy importante considerando la respectiva multiplicidad de esta configuración ya que considera un gran intervalo y le asocia multiplicidades pequeñas para muchos eventos, dicho de otro modo explica que al menos para las condiciones iniciales de este experimento se cumple la idea cualitativa en la cual se espera que para colisiones frontales habrá más multiplicidad pues las densidades y temperaturas alcanzadas son mucho mayores, lo importante de este trabajo es la cuantificación de estos conceptos.

Por último se tiene la distribución para la configuración f) y recordando lo mencionado en la sección 3.5.1 donde parecía captar un poco menos de información de forma equitativa aquí se puede ver que también repercute en la cuantificación de las clases de centralidad, se puede hacer muchas observaciones pero la más notable es que la clase que representa las colisiones más periféricas crece dando a entender que cuando se tienen solo activos los

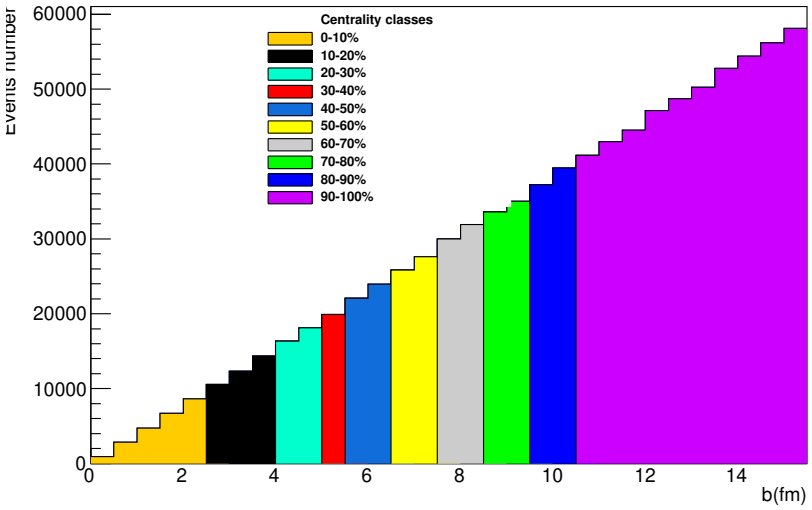


Fig. 3.15.: Parámetro de impacto por número de eventos: configuración f), 4 5 encendidos.

anillos 4 y 5 el detector Be-Be interpreta que al reconstruir menos partículas cargadas las colisiones periféricas tienen más probabilidad de suceder. De algo se tiene garantía y es que, el detector registra menos espectadores y utilizando los conceptos geométricos mencionados en el capítulo 2 observamos que el parámetro de impacto posible disminuye, en una simulación con un parámetro de impacto posible fijo se puede extrapolar que las clases más pequeñas las optimice y la última le dé un rango mayor.

4 Resultados

En el capítulo anterior se muestran muchos resultados previos al objetivo principal de este trabajo, esto con el fin de tener un panorama más amplio de lo que se pretende, aunque cabe resaltar que no son los únicos resultados, existen resultados para otras configuraciones y estudios de otro tipo para todas estas, sin embargo se busca simplificar este proceso para concentrar la atención en los siguientes resultados.

En el presente capítulo se analizan distintos conceptos en la recolección de multiplicidad, por ejemplo, se sabe que si se deja la configuración a) encendida tendrá a su alcance mayor información que la e) y se puede pensar que entre más información mejor, sin embargo análogo a como cuando una cámara se abre con un gran tiempo de exposición puede resultar perjudicial tanta luz, en el caso del detector puede recolectar partículas que no colisionan afectando así los resultados obtenidos.

Se han realizado estudios de sistemas con características distintas para evaluar las cualidades de estos mismos y así obtener una conclusión más completa, en específico se han de comparar las configuraciones que se mencionaron, pero también se toman algunos transportes creados por la colaboración MexNICA y se les hace el mismo tratado aunque para menos configuraciones, comparando así una geometría con espesor de 1.5 cm.

4.1. Optimización para la geometría principal

Recordando que la geometría principal para esta propuesta del Be-Be es en la cual las dos matrices tienen un espesor de 1 cm. y de diámetro 152 cm. cada una, a continuación se presentan los resultados finales que determinan la correlación entre el parámetro de impacto y la multiplicidad con el objetivo linealizar este gráfico, también se presenta la resolución de la centralidad para cada clase y se explica detalladamente las implicaciones de estos resultados.

4.1.1. Correlación de centralidad

La correlación del parámetro de impacto contra la multiplicidad se obtiene utlizando los datos arrojados por los dos procesos Monte Carlo. En el capítulo 2 se introdujo un concepto nombrado como el parámetro de impacto base que es el real para cada una de las colisiones y se determina desde la generación de partículas con UrQMD, posteriormente se hace el transporte de las partículas con los detectores encendidos y es ahí donde el Be-Be reconstruye un parámetro de impacto, es decir, es el que mide. Una vez que se tienen estos dos datos se proceden a analizar.

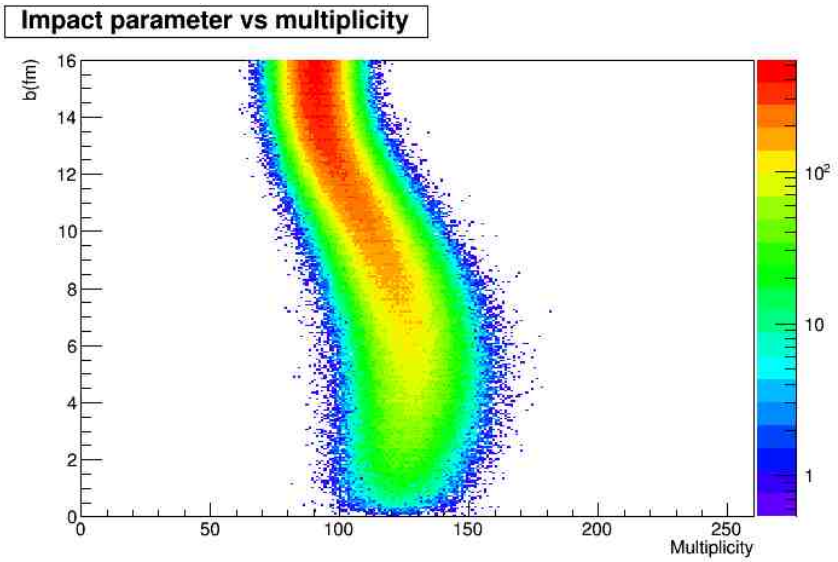


Fig. 4.1.: Correlación anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos.

En el primer gráfico es notable un caos en la relación pues no llega siquiera a acercarse a una función que asocie para un b dado su respectiva multiplicidad, por ejemplo, si se fija un intervalo en el eje de multiplicidad entre 110-120 y se observa los parámetros de impacto correspondientes se observa que pueden ser todos los posibles y esto no brinda información útil. De aquí se puede concluir que no siempre tener más información es mejor, sino buscar que sea información de calidad.

Para la Fig. 4.2 se puede observar una contradicción pues a menos b menor multiplicidad, lo cual no hace sentido ya que se espera que en colisiones centrales haya mayor multiplicidad, aunque esto se le puede atribuir al ruido que generan los espectadores de la colisión y al tener activos los anillos centrales el detector los capta e interpreta como partículas nuevas.

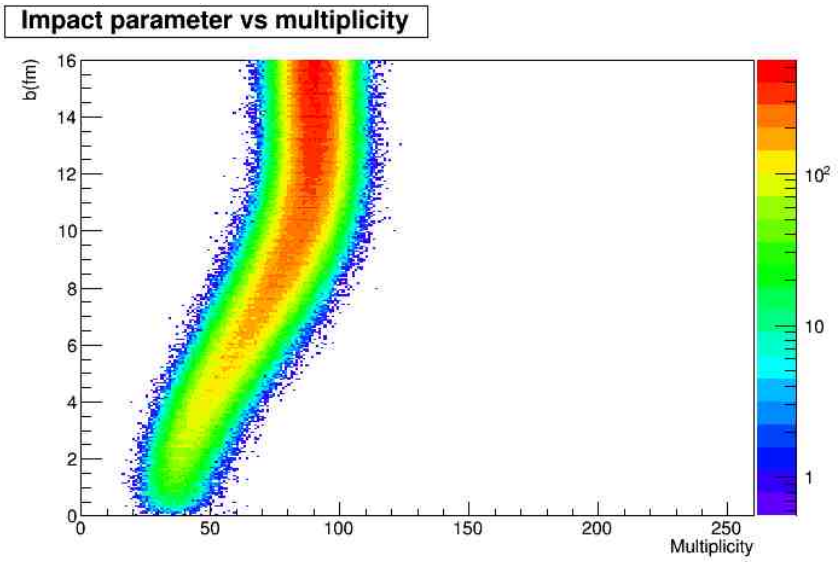


Fig. 4.2.: Correlación anillos 1, 2 y 3 encendidos.

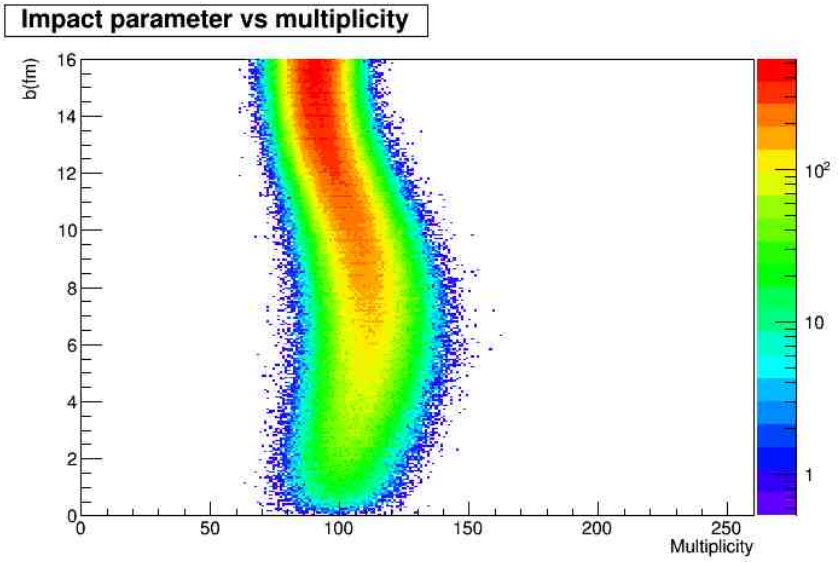


Fig. 4.3.: Correlación anillos 1, 2, 3 y 4 encendidos.

En la Fig. 4.3 se sigue confirmando que los anillos centrales son el problema a la hora de linealizar esta relación.

Para la Fig. 4.4 se encuentra una visible mejoría al desactivar solo el anillo 1, o sea el central, concluyendo que el que más registraba ruido es precisamente ese anillo.

Con los resultados preliminares mostrados en la sección 3.5 se pudo ver una mejora al analizar la configuración e) y la Fig. 4.5 lo confirma. Ahora

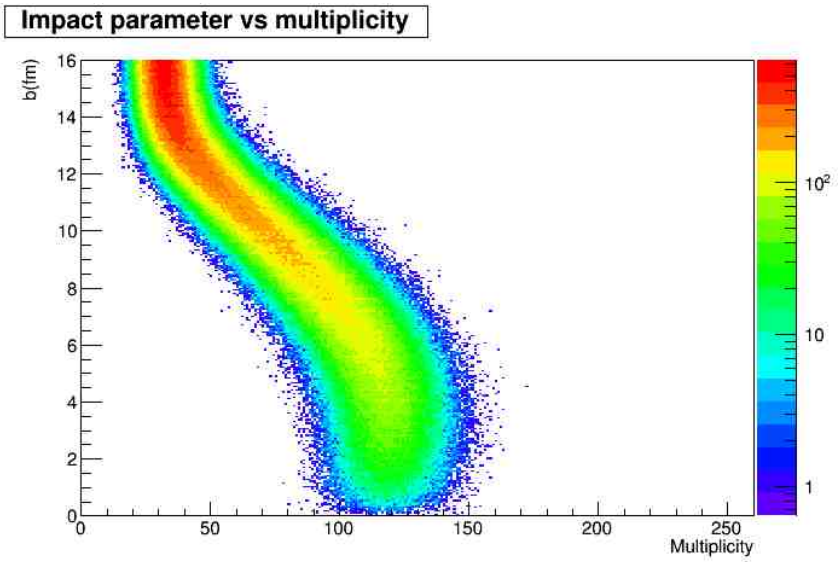


Fig. 4.4.: Correlación anillos 2, 3, 4 y 5 encendidos.

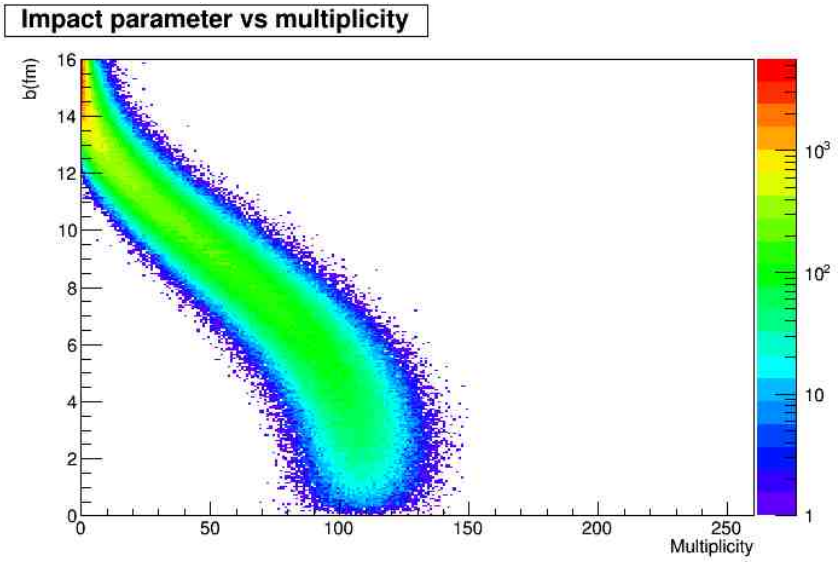


Fig. 4.5.: Correlación anillos 3, 4 y 5 encendidos.

se vuelve interesante el realizar el ejercicio de antes en el cual se fija un intervalo para el eje de multiplicidad, por ejemplo 50-60, y se examina su intervalo respectivo en el eje de b en donde se aprecia una correspondencia que se acerca más a una función, es decir, para un pequeño intervalo de multiplicidades el detector asigna un intervalo de 6-11 en párametro de impacto y una de las finalidades de este trabajo es precisamente eso, linealizar lo mayor posible esta correlación. Lo interesante de este gráfico es también prestar atención a las curvas de nivel que mediante colores expresan el

número de eventos que proporciona esta información y es que se puede notar una pequeña zona color roja en el intervalo de 14-16 para el parámetro de impacto que confirma la necesidad de muchos eventos para que a colisiones muy periféricas haya apenas algo de multiplicidad, así como la zona morada en la multiplicidad de 140-150 que muestra la necesidad de pocos eventos para confirmar que son colisiones centrales.

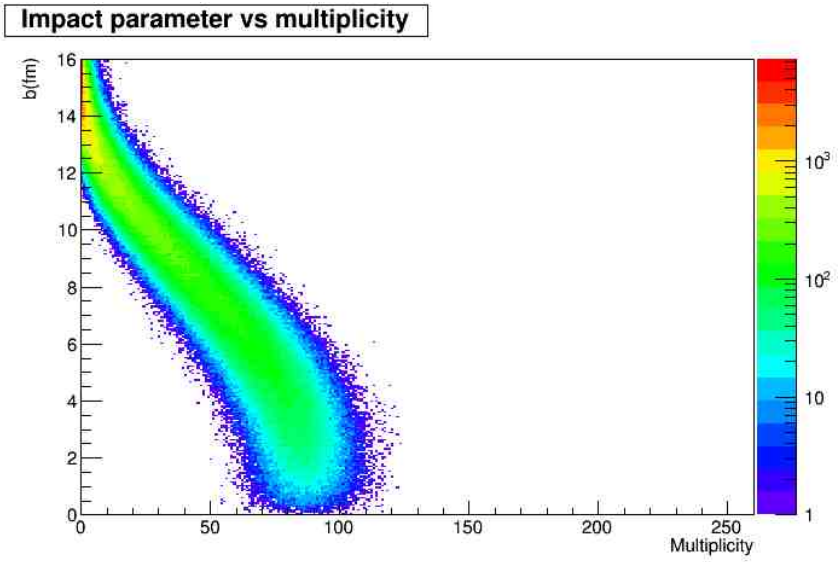


Fig. 4.6.: Correlación anillos 4 y 5 encendidos.

De todos los gráficos que se han mostrado referentes a la correlación es fácil distinguir que los últimos dos son los que arrojan mejores resultados, es imperativo comenzar a sacar conclusiones de qué configuración es la mejor para realizar estudios de centralidad. Viendo este proceso como un filtrado en donde se valore el mejor aprovechamiento de los transportes, se puede ir dando prioridad a la configuración e) y f) para que sean los siguientes apartados los que terminen por definir el resultado.

4.1.2. Resolución de centralidad para las distintas configuraciones

Se ha llegado al apartado de mayor relevancia para este trabajo y es que recordando las funciones que pretende cumplir el detector Be-Be está el ofrecer una resolución a la centralidad para las distintas clases de las que se

ha hablado, las imágenes que se presentan a continuación son gracias a toda la información recolectada por cada análisis.

Se utiliza el estudio de la sección 3.5.2 pues en él se encuentra el párametro de impacto mínimo y máximo que tiene cada clase y con un cálculo básico se determina el parámetro medio para todas las clases. Ahora es importante recordar el concepto introducido en el capítulo 2 pues aquí es donde se utiliza, para cada evento se tiene un párametro de impacto base (el real) y se tiene uno medido por el detector (el promedio), haciendo una comparación del tipo Gauss, es decir, restando estas dos cantidades se esperaría que la campana se centre en el cero para cada transporte, como es de esperarse no siempre sucede y depende de la configuración el que sea mejor o no, para fortuna del experimento se cuenta con mucha estadística la cual permite tener mejores candidatos. Es necesaria también la información adquirida por el estudio de la sección 3.5.1 ya que de ahí se extraen las multiplicidades para cada límite de las clases de centralidad. Todo este extenso trabajo aunado con los transportes y las consideraciones propias para las configuraciones tiene como resultado una gaussiana para cada clase de centralidad en cada caso y si el lector requiere verlas detenidamente se anexan en el apéndice, aunque desafortunadamente para ciertas configuraciones no es posible tener gaussianas para todas las clases y esto debido a la observación mencionada en la descripción de la figura 4.1 ya que al no ser una función, para ciertas clases de centralidad el detector mide todo el espectro de párametros de impacto y les asigna la misma multiplicidad. Aunque haciendo una reflexión en el filtrado de las posibles mejores configuraciones se llega a la conclusión que no es necesario encontrar una solución para este problema y mejor usar el tiempo y trabajo a futuro para explorar otros enfoques del detector.

Primero es necesario explicar los ejes, en el eje vertical se tiene la sigma que se le asocia precisamente a las gaussianas dividido por el párametro de impacto para normalizar la gráfica, mientras que en el eje horizontal se pone la resolución correspondiente para todas las clases. El objetivo de los datos es acercarse al cero para cada punto.

En la Fig. 4.7 se puede ver un pobre análisis debido a lo complicado que se vuelve estudiar datos con tanto caos, aún así se observa una mínima resolución para las colisiones más centrales y un ligera mejoría para la clase 10-20, de cualquier manera la información proporcionada por este gráfico no

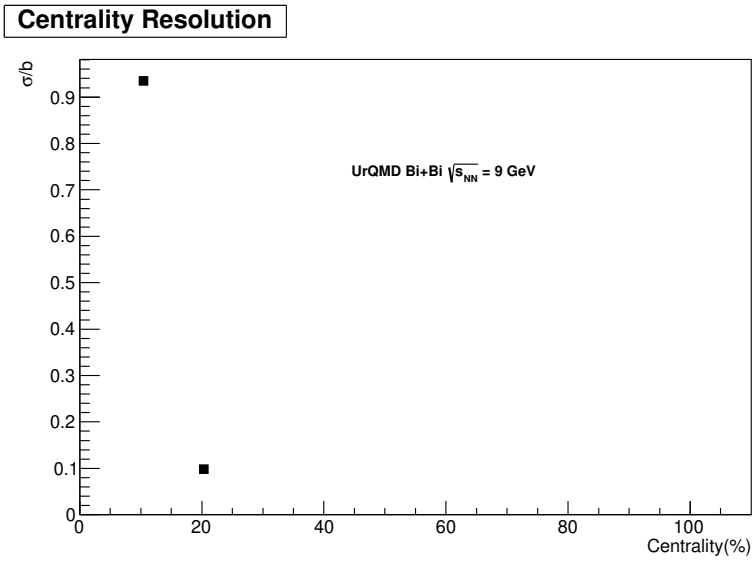


Fig. 4.7.: Resolución anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos.

es muy útil para optimizar el detector pero sí para descartar la idea de que al tener mayor información se obtendría un mejor resultado.

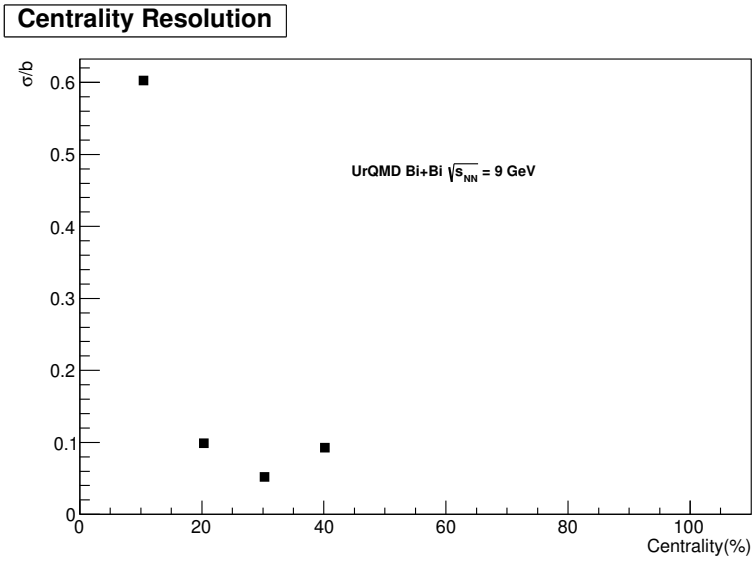


Fig. 4.8.: Resolución anillos 1, 2 y 3 encendidos.

En este gráfico se puede ver que al desactivar los anillos periféricos aparecen más puntos aunque no es sensato prestarles mucha atención pues la figura 4.2 sugiere que esta configuración no es confiable.

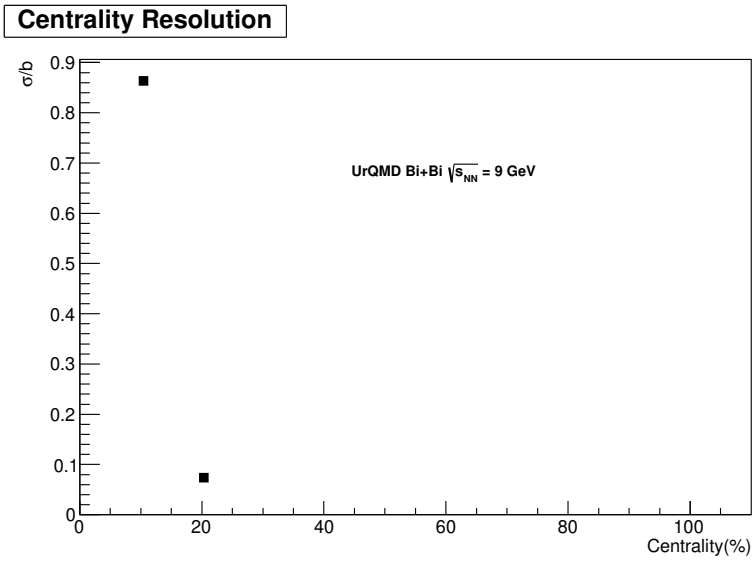


Fig. 4.9.: Resolución anillos 1, 2, 3 y 4 encendidos.

Siguiendo con el análisis en la figura 4.9 se puede ver que al activar un anillo más periférico vuelven a perderse esos puntos y se concluye que este no es el camino para llegar al objetivo.

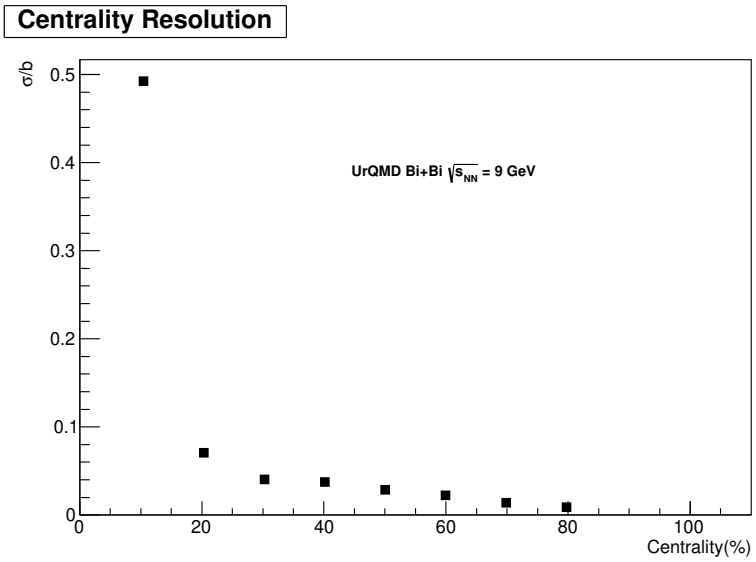


Fig. 4.10.: Resolución anillos 2, 3, 4 y 5 encendidos.

Para estas alturas se sabe que al desactivar el anillo 1 se ven visibles mejorías en el tratado de datos, hay una diferencia abismal entre tener activado el anillo central y no tenerlo confirmando las suposiciones de las posibles

partículas espectadoras. En la figura 4.10 se comienza a tener información muy valiosa acerca de la resolución en centralidad.

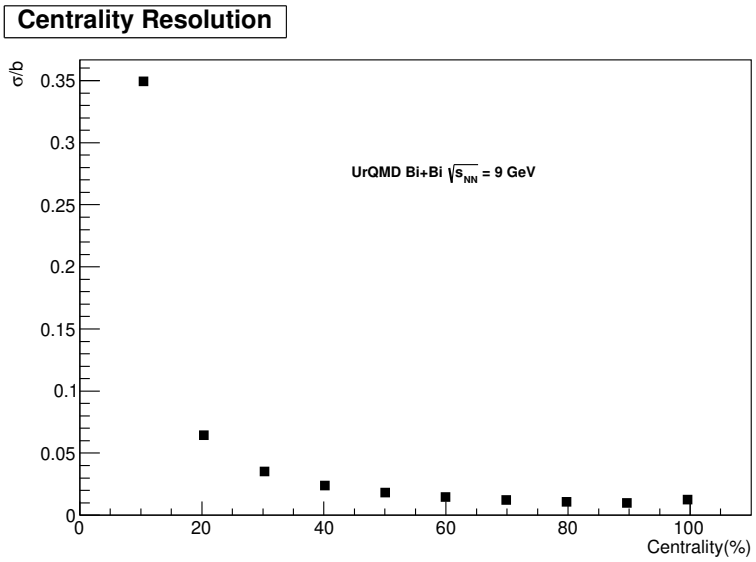


Fig. 4.11.: Resolución anillos 3, 4 y 5 encendidos.

Siguiendo con el filtrado que se propuso en la sección anterior la configuración e) es digna de analizar con detalle. La figura 4.11 brinda muchos elementos para entender el alcanze del Be-Be pues a simple vista se concluye que el detector funciona mucho mejor para colisiones periféricas dando una centralidad casi exacta, sin embargo es un poco deficiente para la clase de centralidad 0-10 en donde se tiene una buena resolución pero no la mejor.

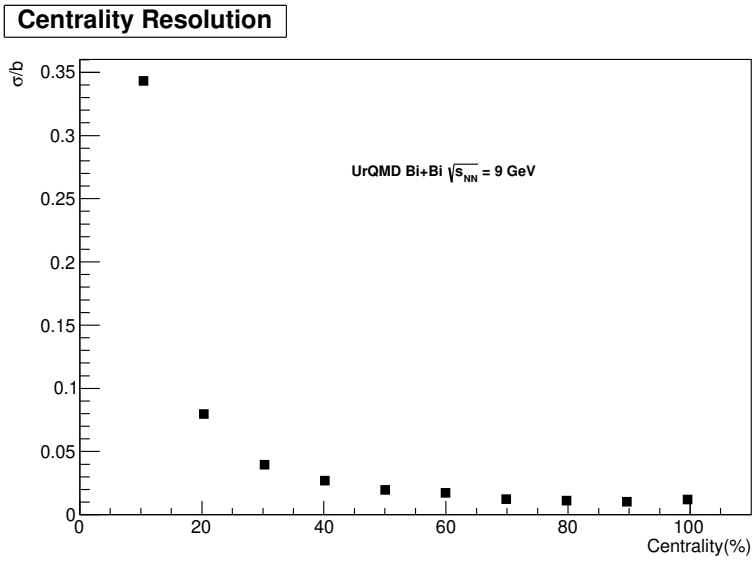


Fig. 4.12.: Resolución anillos 4 y 5 encendidos.

Es aquí en donde se comparan las dos principales candidatas a la mejor configuración, para esto es muy útil superponer las gráficas presentadas y resaltar los resultados.

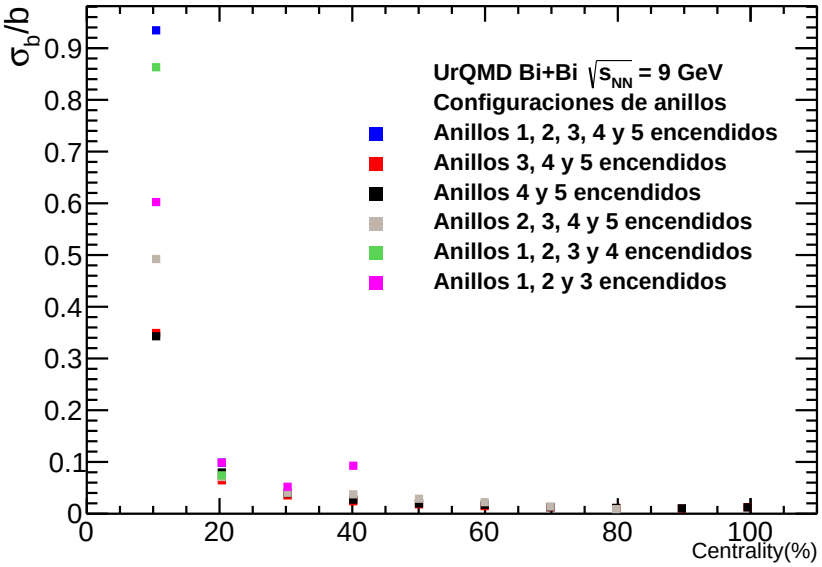


Fig. 4.13.: Comparación de las resoluciones.

Se concluye que la mejor configuración para este estudio en específico es cuando solo los anillos 4 y 5 están activos.

4.2. Comparación de las geometrías 1.5 vs 1 cm.

En este apartado se pretende comparar dos geometrías del detector, es importante resaltar que ambas geometrías son como se describe en el capítulo 3 y dispuestas en el mismo sitio con la única diferencia que hay una con el espesor de 1.5 cm. y la estadística utilizada para el estudio de esta misma fue tomada de la colaboración MexNICA, al no contar con el mismo tratado que se le dio a la geometría principal (la de 1 cm.) solo se comparan 2 configuraciones las cuales en su momento parecían las más interesantes y son cuando todos lo anillos son activados y cuando solo 3,4 y 5 se encienden.

4.2.1. Configuración a)

Se sabe que la configuración a) no es la mejor al menos para la geometría principal, pero es interesante observar lo que puede presentar un nuevo espesor. Para esta sección se muestra únicamente la correlación y resolución de centralidad de la geometría con espesor de 1.5 cm., ya que si se quiere observar los gráficos correspondientes a la geometría de 1 cm. se puede regresar a la figuras 4.1 y 4.7, respectivamente.

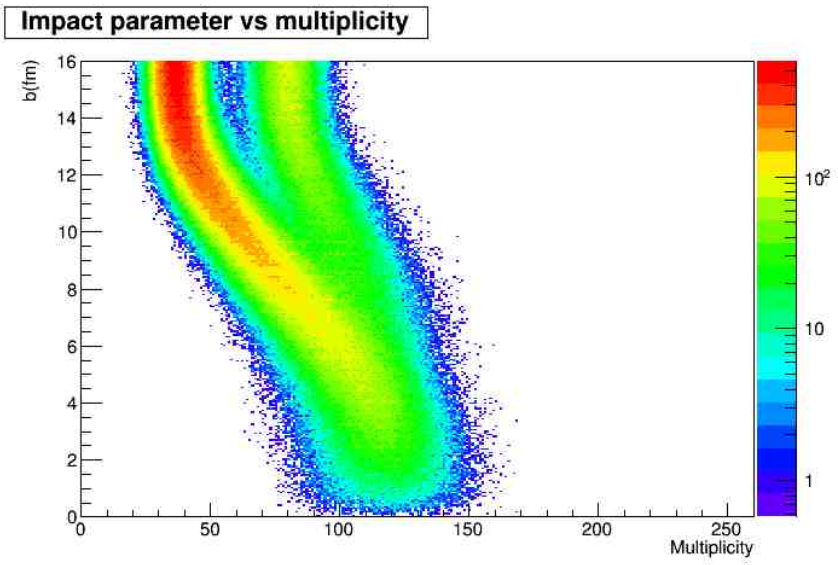


Fig. 4.14.: Correlación para anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos, espesor 1.5 cm.

Aquí se puede descifrar un dato muy interesante y es que en la gráfica se observa una partición en el intervalo de b= 12-16, es decir, le está asociando

dos multiplicidades a un mismo intervalo pero de forma muy marcada, no es lo mismo que en la geometría de 1 cm. en el que sí se aprecia un traslape pero de forma más gradual, en este caso queda claro que hay otro grupo de partículas que crea este efecto, sería interesante poder estudiarlo en el tiempo de resolución temporal lo cuál se plantea al final de este trabajo.

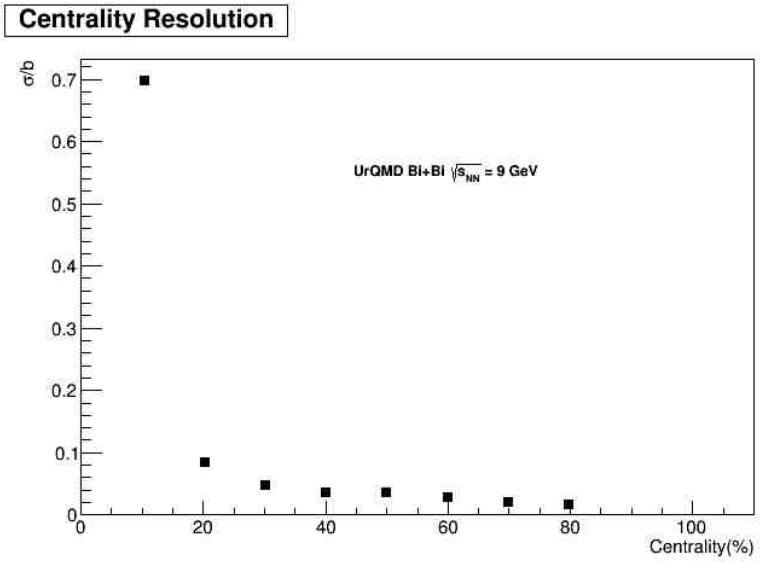


Fig. 4.15.: Resolución para anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos, espesor de 1.5 cm.

Con este espesor aparecen más clases de centralidad que con en el pasado y es que si bien es cierto que existe un caos en la correlación, tiene un poco más de anchura en el eje de multiplicidades, lo cual permite ajustar la gráfica en algo parecido a una función.

4.2.2. Configuración e)

En este caso se tiene el conocimiento previo de que esta configuración es muy confiable al menos para los estudios dedicados en este trabajo, por lo que resulta de vital importancia resaltar las virtudes de cada espesor y así tomar la decisión de cual elegir para el detector. Del mismo modo que en la sección anterior, solo se presentan los gráficos de la geometría con espesor 1.5 cm para evitar redundancia, si se quiere ver los gráficos del otro espesor véase las figuras 4.5 y 4.11, respectivamente.

Se puede observar una gran similitud en esta configuración para ambas geometrías, por lo que sugiere que un espesor mayor no marcaría una gran

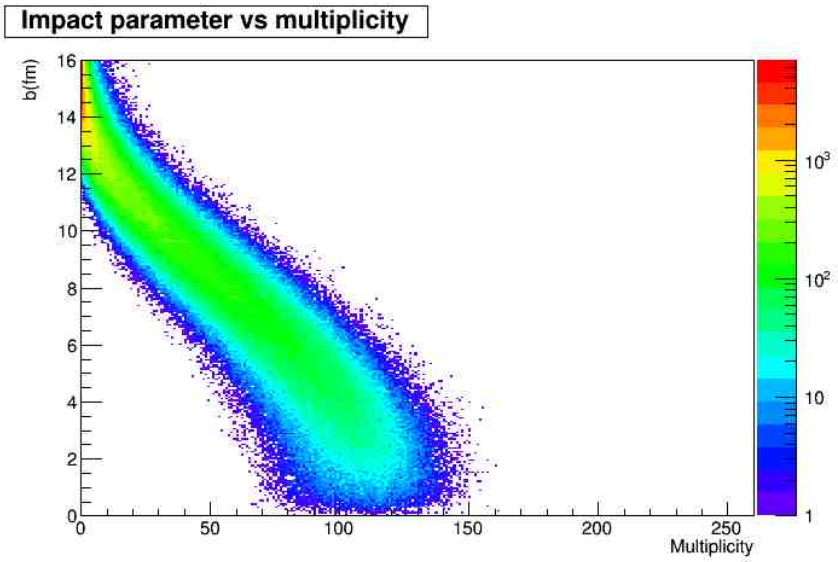


Fig. 4.16.: Correlación para anillos 3, 4 y 5 encendidos, espesor de 1.5 cm.

diferencia en el estudio de la centralidad, aunque como se menciono anteriormente no se descarta la utilidad de esta comparación en otros enfoques del detector.

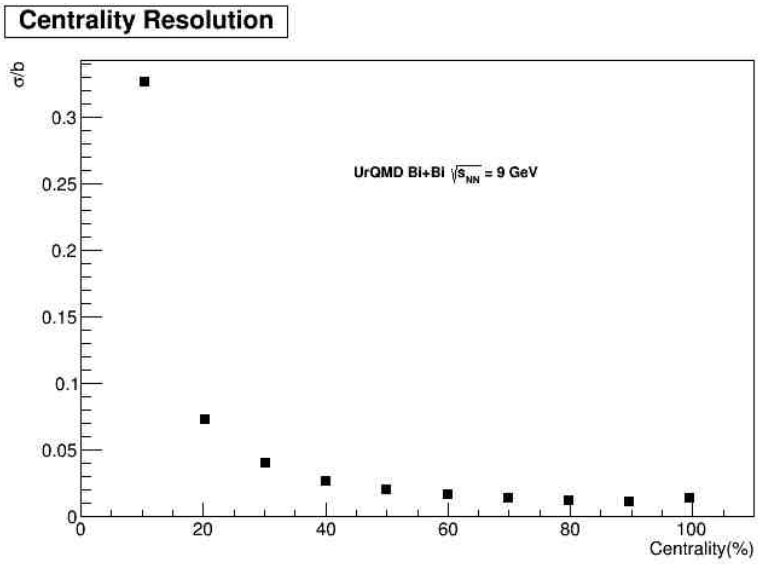


Fig. 4.17.: Resolución para anillos 3, 4 y 5 encendidos, espesor de 1.5 cm.

Por último se tiene la resolución para cada clase de centralidad para la configuración e) y si se analiza con detenimiento se puede ver un pequeño mejor resultado para la clase de centralidad 0-10 para el espesor 1.5 cm lo cual no sorprende, pues se sabe que el detector no es el mejor en ese rango,

sin embargo para las otras clases se puede comprobar que funciona mejor la geometría con espesor de 1 cm, este estudio termina siendo muy útil ya que además de tener un mejor resultado se economiza material, lo cual a la hora de crear un aparato científico siempre viene mejor. A continuación se superponen las imágenes que se mencionan para dejar clara la mejoría.

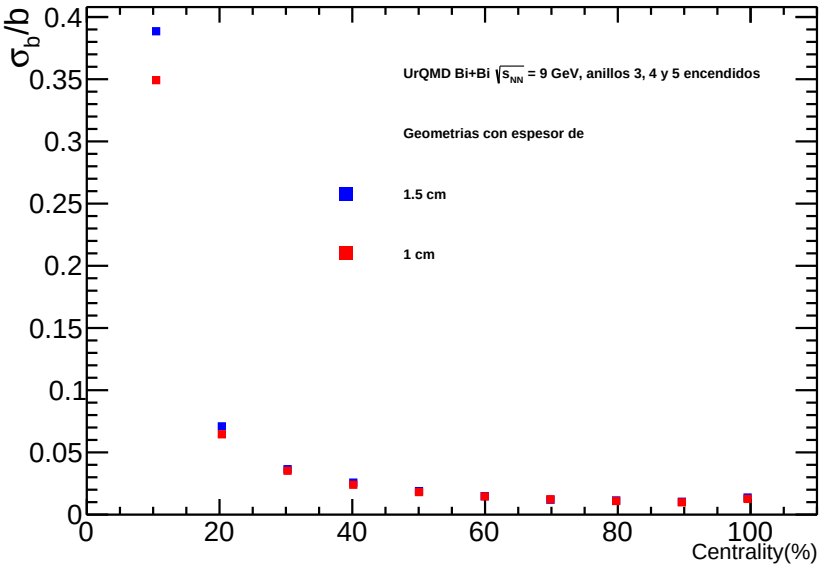


Fig. 4.18.: Comparación de los espesores 1.5 vs 1cm., para anillos 3, 4 y 5 encendidos.

5 Conclusión

5.1. Resolución y correlación (mejor configuración)

Lo interesante de este trabajo es que los cálculos que se hacen son para bajas energías, por lo que utilizar un modelo que trabaja con datos medidos a bajas energías como lo es el de Glauber, permite una mejor sincronía. El detector Be-Be puede ser empleado para muchos estudios en las colisiones de iones pesados relativistas, en este trabajo se hace énfasis en la centralidad. Es importante resaltar que para cada sistema y energía asociada se tendrán distintos resultados, en el presente trabajo se simularon colisiones minimum bias $Bi + Bi$ a $\sqrt{S_{NN}} = 9$ GeV.

Desde muy temprano en este trabajo se determinó que al haber tenido menos anillos encendidos se capta menos información y repercute directamente en cómo lo interpreta el detector, al desactivar los anillos 1 y 2 se pueden ver resultados congruentes con lo que se espera, lo cual es de vital importancia para la caracterización del Be-Be, además se segmenta el espectro de las clases de centralidad, cuantificando los límites, que siempre puede ser útil para otros estudios. Es interesante que al desactivar el anillo 3 hay un cambio marcado en los intervalos de b para las clases de centralidad sugiriendo que el detector interpreta esta menor información como un posible aumento de colisiones periféricas y atribuirle este menor número de partículas cargadas medidas a un aumento en el rango de probables b. Es hasta el último análisis, en donde se determina la resolución de centralidad, que se confirma que precisamente la configuracón f) (anillos 4 y 5 encendidos) es la mejor, pues tiene un mayor acercamiento entre el parámetro de impacto calculado y el de base (real). Además se concluye que el detector Be-Be funciona mejor en colisiones periféricas.

Otra conclusión importante es que la geometría con espesor de 1 cm. es mejor que la de 1.5 cm., lo cual es bueno pues siempre se agradece ahorrar material.

Estos resultados se pueden utilizar en conjunto con la información que recauden los detectores FHCal y FFD para tener un mayor número de datos, que al ser estadísticos, se aproximan de mejor manera a conclusiones más precisas sobre la centralidad de la colisión. Además de que el tener redundancia brinda un panorama más amplio en el enfoque del disparo, es decir, para discriminar información y almacenar la más interesante filtrando la repetitiva. Claro que siempre es posible mejorar el estudio si se consideran más eventos u otros generadores, pero lo expuesto da una idea confiable de toda la utilidad de Be-Be para el experimento MPD-NICA.

5.2. Trabajo a futuro

Una vez finalizado este trabajo, se ha observado la necesidad de tener más analisis pero con distintos generadores, es decir, sería interesante recrear toda esta información pero ahora con el generador EPOS o LAQGSM y viendo el tiempo que aún se tiene para la posible instalación del detector Be-Be (tentativamente la segunda corrida del experimento MPD-NICA) se pueden realizar esos estudios. Existe también una propuesta de una geometría de un espesor de 1 cm pero aumentando al doble el quinto anillo y teniendo en cuenta lo arrojado por este trabajo parece ser un camino viable a la optimización del detector. Por supuesto está el camino de caracterizar el detector desde su parte física buscando el mayor aprovechamiento de sus materiales, este trabajo puede ser de mucha utilidad para considerar ciertos factores.

En la Fig. 4.14 se observa un resultado interesante y es que la imagen sugiere que existe un traslape de partículas en la correlación de b con su multiplicidad abriendo la puerta al estudio de la resolución temporal pues pareciera que son dos distintos paquetes de partículas. Esta puede ser una brecha a investigar en el futuro para comprender mejor al Be-Be, claro que disponer de ese arreglo puede traer consecuencias en el tema de la absorción de energía, lo cual no vuelve nada trivial a este posible análisis.

Se mencionó brevemente en la sección 2.4 al experimento SPD y es también una vía de planes a futuro para extender este detector a ese experimento, es decir, llevar este tipo de estudios para el ambiente SPD considerando

todas las implicaciones que tiene como cambiar el programa MPD-Root por SPD-Root, etc.

6 Glosario

- **NICA:**Acelerador de partículas que está siendo construido en JINR. De sus siglas en inglés, Nuclotron based Ion Collider fAcility.
- **MPD:** Detector multi-propósito que será parte del experimento NICA. De sus siglas en inglés, Multi-Purpose Detector.
- **JINR:** Centro de investigación en física nuclear en Dubná, Rusia. De sus siglas en inglés, Joint Institute for Nuclear Research.
- **Be-Be:** Detector de monitoreo de haz, de sus siglas en inglés Beam-beam monitoring detector.
- **mbb:** Sistema despertador diseñado para el experimento MPD-NICA.
- **FFD:** Detector de trigger diseñado para el experimento MPD-NICA. Fast Forward Detector, por sus siglas en inglés.
- **MexNICA:** Colaboración formada por profesores y estudiantes de distintas universidades de México.
- **RHIC:** Acelerador Relativista de Iones Pesados. De sus siglas en inglés, Relativistic Heavy Ion Collider.
- **TPC:** Cámara de proyección temporal. De sus siglas en inglés, Time Projection Chamber.
- **ZDC:** Calorímetros de cero grados. De sus siglas en inglés, Zero Degree Calorimeter.
- **MCG:** Monte Carlo Glauber. Estudia las colisiones entre núcleos en términos de las colisiones individuales de los nucleones que les componen.
- **QGP:** Plasma de Quark-Gluones. Fase de la cromodinámica cuántica que existe cuando la temperatura y/o la densidad son muy altas.
- **C:** Clase de centralidad.
- **N:** Asociada a la multiplicidad del evento.

44

- **b:** Párametro de impacto. Distancia entre el centro de dos núcleos que colisionan.
- b_{base}**:** Parámetro de impacto base. b que el generador registra como la real de la colisión.
- σ_{AA}**:** Sección eficaz de una colisión A + A.
- N_{coll}**:** Número de colisiones que sufren los nucleones.
- N_{part}**:** Número de nucleones que intervienen en la colisión.
- N_{esp}**:** Número de nucleones que no intervienen en la colisión.
- **Minimum Bias (MB):** Eventos que pueden tener un parámetro de impacto entre $b_{min} = 0$ y b_{max}.
- **HIJING:** Generador de interacción de iones pesados. De sus siglas en inglés, Heavy Ion Jet INteraction Generator.
- **UrQMD:** Paquete de simulación Monte Carlo para distintos sistemas de interac- ción. De sus siglas en inglés, Ultra-relativistic-Quantum-Molecular-Dynamics.
- **MPD-Root:** Software que está siendo desarrollado para simulación y análisis del experimento MPD-NICA.
- **Pseudoapidez:** Coordenada espacial que describe el ángulo de la partícula respecto al eje del haz [1] de la forma: $\eta = -\ln\tan\frac{\theta}{2}$, donde el eje del haz está en $\theta = 0$.
- **A + A:** Colisón entre dos núcleos del mismo tipo, donde A es el número de núcleos que les componen.
- **p + p:** Colisión entre dos protones.
- **A + p:** Colisón entre núcleos y protones.

Bibliografía

[1]A Grigoryan, et al. *Centrality dependence of particle production in p-Pb collisions at s NN= 5.02 TeV*. Physical Review C-Nuclear Physics, 2015 (vid. págs. 2, 45).

[2]A. Białas, M. Błeszyński, W. Czyż. *Relation Between the Glauber Model and Classical Probability Calculus*. Acta. Phys. Pol. B 8,389, 1977 (vid. págs. 2, 4).

[3]A.Kurepin, A.Litvinenko, E.Litvinenko. *Determination of centrality in nucleus-nucleus collisions on the MPD/NICA installation*. Physical Review Letters, 1 (vid. pág. 2).

[4]Alejandro Ayala, et al. *Core meets corona: A two-component source to explain and global polarization in semi-central heavy-ion collisions*. Physical Letters B., 2020 (vid. págs. 2, 8, 9).

[5]ALICE Collaboration. *Performance of the ALICE VZERO system*. IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB, 2013 (vid. págs. 2, 17).

[6]ALICE Collaboration (J. Adam, A. Fernández Tellez, M. Rodríguez Cahuantzi, et al). *Centrality dependence of the charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at 5.02 TeV*. Physical Review Letters, 2016 (vid. pág. 2).

[7]ALICE Collaboration (S. Acharya, A. Fernández Tellez, M. Rodríguez Cahuantzi, et al). *Centrality and pseudorapidity dependence of the charged-particle multiplicity density in Xe-Xe collisions at 5,44 TeV*. Physical Letters B., 2019 (vid. pág. 2).

[8]C. Loizides. *Glauber modeling of high-energy nuclear collisions at the subnucleon level*. Physical Review Letters, 2016 (vid. pág. 2).

[11]J. Chauvin, et al. *Low and intermediate energy nucleus-nucleus elastic scattering and the optical limit of Glauber theory*. Physical Review C, 1983 (vid. págs. 2, 4).

[13]L. Valenzuela. *Estudio de Centralidad de los eventos en el Experimento MPD-NICA a través de la Multiplicidad en el Detector de Haz (Be-Be) que construye la Colaboración MexNICA en JINR*. [Tesis magistral, Universidad de Sonora], 2020 (vid. págs. 2, 11).

[15]Ludlam TW, Pfoh A, Shor A. *HIJET: a Monte Carlo event generator for P-nucleus-nucleus collisions*. United States: N. p., 1985 (vid. págs. 2, 4, 5).

[16]M. B. Golubeva, et al. *Nuclear-Nuclear Collision Centrality Determination by the Spectators Calorimeter for the MPD Setup at the NICA Facility*. Physical Review Letters, 2012 (vid. págs. 2, 14).

[17]M. Rodríguez Cahuantzi and for the MEXNICA group. *MEXnICA, Mexican group in the MPD-NICA experiment at JINR*. J. Phys.: Conf. Ser., 2017 (vid. pág. 2).

[18]M. Rodríguez Cahuantzi, et al. *Performance of BeBe, a proposed dedicated beam-beam monitoring detector for the MPD-NICA experiment at JINR*. Manuscrito presentado para su publicación, 2022 (vid. pág. 2).

[19]M. Rodríguez Cahuantzi, et al. *The conceptual design of the miniBeBe detector proposedfor NICA-MPD*. Manuscrito presentado para su publicación, 2020 (vid. págs. 2, 20).

[20]Marcus Bleicher, et al.) *Relativistic hadron-hadron colli- sions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model*. Journal of Physics G: Nuclear y Particle Physics, 1999 (vid. págs. 2, 10).

[21]Michael L. Miller, et al. *Glauber Modeling in High Energy Nuclear Collisions*. Physical Review Letters, 2007 (vid. págs. 2, 4-6, 14).

[22]Michael Mitrovski, et al. *Charged particle (pseudo-)rapidity distributions in p+p/p+p and Pb+Pb/Au+Au collisions from SPS to LHC energies from UrQMD*. Physical Review C, 2009 (vid. págs. 2, 10).

[24]MPD Collaboration. *Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA*. Manuscrito presentado para su publicación, 2022 (vid. págs. 2, 14).

[25]Onyekwelu Okeke, Uzodinma y Azwinndini Muronga. "ULTRA RELATIVISTIC QUANTUM MOLECULAR DYNAMICS". En: (jul. de 2006) (vid. págs. 2, 9).

[27]R. J. Glauber. *Lectures on Theoretical Physics*. WE Brittin y LG Dunham, p.315, 1959 (vid. págs. 2, 4).

[28]SPD Collaboration (A.V. Guskov, et al). *Conceptual design of the Spin Physics Detector*. Manuscrito presentado para su publicación, 2022 (vid. pág. 2).

[30]V. I. Yurevich, et al. *Fast Forward Detector for MPD/NICA Project: Concept, Simulation, and Prototyping*. Physics of Particles y Nuclei Letters, 2013 (vid. págs. 2, 15, 16).

[31]Vadim Volkov, et al. *Application of FHCal for Heavy-Ion Collision Centrality Determination in MPD/NICA Experiment*. Particles, 2021 (vid. págs. 2, 15).

[32]W.Czyż and L.C.Maximon. *High energy, small angle elastic scattering of strongly interacting composite particles*. Physical Letters B. 52, 59, 1969 (vid. págs. 2, 4, 5).

[33]W.Czyż and L.Leśniak. *Elastic scattering of very high energy particles from nuclei*. Physical Letters B. 24, 227, 1967 (vid. págs. 2, 4).

Webpages

[@9]D. Piparo, et al. *ROOT Primer*. 2021. URL: `https://root.cern/primer/` (vid. pág. 3).

[@10]Heber Zepeda. *Desarrollo de un sistema de disparo para el experimento MPD-NICA del JINR*. 2017. URL: https://indico.nucleares.unam.mx/event/1285/session/1/contribution/71/material/slides/0.pdf (vid. pág. 2).

[@12]JINR. *Megaproject NICA*. 2020. URL: https://nica.jinr.ru/megaproject.php (vid. págs. 2, 13).

[@14]Lucina Espinoza. *The BeBe detector for the MPD luminosity monitoring system*. 2021. URL: https://indico.jinr.ru/event/2002/contributions/12061/attachments/9838/15914/Pres_VII_Collaboration_Meeting_MPD.pdf (vid. pág. 2).

[@23]MPD Collaboration. *Simulation and Analysis Framework for the MPD experiment of the NICA project*. 2016. URL: http://mpdroot.jinr.ru (vid. pág. 3).

[@26]P. Nieto. *Implementation of new Detectors and Geometries*. 2021. URL: https://indico.nucleares.unam.mx/event/1659/session/1/contribution/6 (vid. págs. 2, 17).

[@29]Technology Org. *Russia to Build a Heavy Ion Accelerator in Dubna*. 2013. URL: https://www.technology.org/2013/07/23/russia-to-build-a-heavy-ion-accelerator-in-dubna (vid. págs. 2, 13).

Apéndice

A

Es importante mencionar que en la etapa actual del experimento MPD-NICA, los aportes más utiles vienen de las simulaciones a nivel Monte Carlo, ya que gracias a estas misma se puede tener una idea de las posibilidades de controlar de la mejor manera el experimento. De ahí surge la necesidad de analizar cada detector, pues es el primer paso de su construcción para tener el mejor rendimiento de todo el sistema. Los generadores Monte Carlo son programas que simulan la producción de partículas y el decaímiento de estas a altas energías. Con ayuda de algunos Softwares creados por los experimentos se puede caracterizar el detector en cuestión, al entender cómo captura las partículas creadas por los generadores. Por lo tanto en las siguientes secciones se hará una breve revisión de los rasgos del generador UrQMD (utilizado en este trabajo) y los macros de transporte y análisis en MPD-Root, utilizados para la caracterización del detector Be-Be.

A.1. UrQMD

En la sección 2.3 se habló acerca del funcionamiento de UrQMD, sus bases y los parámetros de colisión que se utilizaron para este trabajo. En esta sección se abordará directamente esos parámetros, explicando lo que representan para el experimento utilizando de ejemplo el código con el cual se corrió una simulación.

Archivo reco.C

pro 209 83 *Caracterización del proyectil*.
tar 208 83 *Caracterización del objetivo*.
nev 500 *#Número de eventos*.
imp -15.9 *#Parámetro de impacto de 0 a 16 fm*.
elb 9 *#Energía del laboratorio*.
tim 200 200 *#Tiempo de evolución del sistema, en pasos de 200*.
f13 *Archivo de salida descativado*.

49

#f14 *Archivo de salida con el cual se trabaja en MPD-Root*.
f15 *Archivo de salida descativado*.
f16 *Archivo de salida descativado*.
f19 *Archivo de salida descativado*.
f20 *Archivo de salida descativado*.
#CTOption(41)=1
cto 41 1 Opciones especiales, para estudios específicos.
xxx

- pro 209 83: Caracteriza el proyectil con base en su número total de nucleones (izquierda) y número de protones (derecha).
- tar 209 83: Caracteriza el objetivo con la misma idea anterior.
- nev: Número de eventos, entre mayor estadística mejores resultados.
- imp -15.9: Parámetro de impacto posible de 0 a 15.9 fm (asegura al menos una colisión) a MB.
- elb: Energía en el centro de masa del sistemaen GeV.
- tim 200 200: Tiempo de evolución del sistema, en pases de 200. Se escoge lo suficientemente grande para considerar tanto la hadronización de las partículas como su llegada a los distintos detectores.
- cto: Archivo de salida tipo f14.
- xxx: Marca el final del archivo.

Cada $testf_i$ brinda información de distinta naturaleza, en este análisis al único que se recurrió fue al testf14.

El archivo reco.C se corrió con otro llamado runqmd.bash desde la terminal. Se debe tener claro que este archivo sirve como representación de las simulaciones de UrQMD ya que en realidad el análisis fue hecho con una estadística de 2000 de estos archivos, utilizando el Cluster de la colaboración Mex-NICA.

A.2. Proceso para la obtención de la resolución para cada configuración

A.3. Macros para estudios de centralidad

Para todo este trabajo se utilizaron una lista de macros que fueron evolucionando el análisis según lo que se buscaba encontrar.

runMC.C

Este macro fue el encargado de realizar el transporte de partículas en el experimento MPD-NICA, a través del ambiente ROOT se consideraron todos los detectores antes mencionados y se simuló, utilizando el archivo de salida de UrQMD, la cinemática de las partículas creadas a partir de la colisión. Este script es de vital importancia pues es en el que se consideran las características principales del sistema como la geometría (importa un archivo llamado geomtrystage.C), los anillos activados (los categoriza por celdas) y haciendo uso de otro archivo llamado mpdloadlibs.C enciende o apaga los detectores a conveniencia. Este script exporta un archivo de tipo root que crea los árboles para el análisis porterior.

No se hace reconstrucción por la etapa tan temprana del experimento.

bmulclasses.C

Una vez que se obtiene el archivo de tipo root y continuando con la idea que se ha mencionado varias veces para optimizar tiempo de simulación, se utiliza el archivo bmulclasses.C para unir los 2000 archivos de transporte mediante el clúster y así tener el análisis ya de centralidad para una estadística razonable. Este macro no solo une los archivos de transporte, sino también genera los histogramas de multiplicidad en Be-Be, donde está toda la información de las partículas cargadas creadas y los parámetros de impacto, aunque en esta instancia aún no se tienen clasificados estos datos con base en su clase de centralidad.

multiplicityclasses.C

Es el archivo que calcula obtiene los valores de multiplicidad para cada clase de centralidad y además crea los histogramas que clasifican la multiplicidad

con base en su número de eventos. Requiere el archivo bmulclasses.root como entrada.

centralityclasses.C

Este script calcula los parámetros de impacto que delimitan las clases de centralidad y genera los histogramas con la clasificación de los eventos en distintas clases de centralidad. Utiliza de entrada el archivo bmulclasses.root.

Correlation.C

Este archivo crea los histogramas de correlación entre el parámetro de impacto y la multiplicidad y sirve para buscar linealizar esta correlación con base en los anillos activados, utiliza como entrada el archivo root de transporte.

ResolutionCentrality.C

Por último se tiene al archivo que permite cumplir con el objetivo principal de este trabajo y es que es el script que analiza toda la información recopilada por todo este análisis, utilizando información de las clases de centralidad como los intervalos de multiplicidades, el b promedio y el b_{base} que tiene cada configuración de anillos activados.

A.4. Gaussianas

Índice de figuras

2.1 Esquema del modelo de Glauber[21]. 6
2.2 Ilustración de una colisión no central[4]. 8

3.1 Esquema de la construcción de NICA[@12]. 13
3.2 Esquema de FHCal[31]. 15
3.3 Esquema del FFD[30]. 16
3.4 Posición de Be-Be en el MPD-NICA. 17
3.5 Geometría del Be-Be. 18
3.6 Esquema de configuraciones. 19
3.7 Esquema del proceso realizado. 20
3.8 Partículas cargadas por número de eventos: configuración a). Anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos. 21
3.9 Partículas cargadas por número de eventos: configuración b). Anillos 1, 2 y 3 encendidos. 21
3.10 Partículas cargadas por número de eventos: configuración e). Anillos 3, 4 y 5 encendidos. 22
3.11 Partículas cargadas por número de eventos: configuración f). Anillos 4 y 5 encendidos. 23
3.12 Parámetro de impacto por número de eventos: configuración a). Anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos. 24
3.13 Parámetro de impacto por número de eventos: configuración b). Anillos 1, 2 y 3 encendidos. 24
3.14 Parámetro de impacto por número de eventos: configuración e). Anillos 3, 4 y 5 encendidos. 25
3.15 Parámetro de impacto por número de eventos: configuración f), 4 5 encendidos. 26

4.1 Correlación anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos. 28
4.2 Correlación anillos 1, 2 y 3 encendidos. 29
4.3 Correlación anillos 1, 2, 3 y 4 encendidos. 29
4.4 Correlación anillos 2, 3, 4 y 5 encendidos. 30

53

4.5 Correlación anillos 3, 4 y 5 encendidos. 30
4.6 Correlación anillos 4 y 5 encendidos. 31
4.7 Resolución anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos. 33
4.8 Resolución anillos 1, 2 y 3 encendidos. 33
4.9 Resolución anillos 1, 2, 3 y 4 encendidos. 34
4.10 Resolución anillos 2, 3, 4 y 5 encendidos. 34
4.11 Resolución anillos 3, 4 y 5 encendidos. 35
4.12 Resolución anillos 4 y 5 encendidos. 36
4.13 Comparación de las resoluciones. 36
4.14 Correlación para anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos, espesor 1.5 cm. 37
4.15 Resolución para anillos 1, 2, 3, 4 y 5 encendidos, espesor de 1.5 cm. 38
4.16 Correlación para anillos 3, 4 y 5 encendidos, espesor de 1.5 cm. 39
4.17 Resolución para anillos 3, 4 y 5 encendidos, espesor de 1.5 cm. . 39
4.18 Comparación de los espesores 1.5 vs 1cm., para anillos 3, 4 y 5 encendidos. 40

Índice de cuadros

3.1 Lista de configuraciones. 19

55

Dedicatoria

A Kevin Morales Maldonado, descanse en paz.

Puebla, Junio, 2022

Braian Adair Maldonado Luna