



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA

ESTUDIO DE CENTRALIDAD DE LOS EVENTOS EN EL
EXPERIMENTO MPD-NICA A TRAVÉS DE LA MULTIPLICIDAD
EN EL DETECTOR DE HAZ (BEBe) QUE CONSTRUYE LA
COLABORACIÓN MEXNICA EN JINR

Una tesis presentada a la Universidad de Sonora
para la obtención del Título de
Maestro en Ciencias (Física)

por

LUIS VALENZUELA CÁZARES

bajo la dirección de

Maria Elena Tejeda-Yeomans

Hermosillo, Sonora, 2020

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Luis Valenzuela Cázares

Estudio de centralidad de los eventos en el experimento MPD-NICA a través de la multiplicidad en el detector de haz (BeBe) que construye la colaboración MexNICA en JINR

Fecha de examen: 11 de Agosto de 2020

Directora de Tesis: Maria Elena Tejeda-Yeomans

Departamento de Investigación en Física

Universidad de Sonora

Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro

C.P. 83000

Hermsillo, Sonora, México

RESUMEN

La centralidad está relacionada con la región de traslape de los núcleos que colisionan, por lo cual su conocimiento resulta esencial en el estudio de la materia nuclear en condiciones extremas de temperatura y presión. En este documento se presentan los estudios realizados para la determinación de la centralidad de colisiones de núcleos de oro en las condiciones del experimento MPD-NICA (11 GeV por nucleón) mediante la multiplicidad en el detector de monitoreo de haz (BeBe, beam-beam monitoring detector) que construye la colaboración MexNICA en el Joint Institute for Nuclear Research (JINR) en Dubna, Rusia. Dichos estudios conforman este trabajo de tesis del programa de Maestría en Ciencias (Física) bajo la dirección de la Dra. Maria Elena Tejeda-Yeomans. Parte de este trabajo tuvo lugar en una estancia de investigación bajo la supervisión del Dr. Oleg Rogachevsky en las instalaciones del Laboratorio de Altas Energías del JINR. Como actividades complementarias, se participó en la programación y análisis de un sistema despertador miniBeBe (inner beam monitoring detector) para el mismo experimento, en el entorno de trabajo de MPDROOT. También se participó en la elaboración de un manual de MPDROOT referente a la instalación de los detectores propuestos por MexNICA, así como la manipulación de dicho software. Este manual se encuentra en el anexo. Además, se contribuyó en la creación y actualización del repositorio del experimento MPD-NICA dedicado para el desarrollo de BeBe y mini-BeBe en el software MPDROOT. Entre los estudios derivados de este trabajo resultó una contribución a un artículo de la colaboración MexNICA sobre BeBe.

Keywords— centralidad, multiplicidad, MPD-NICA, MexNICA.

ABSTRACT

Centrality is related to the overlapping region of the colliding nuclei, such that knowing them is essential in the study of nuclear matter in extreme temperature and pressure conditions. This document presents the studies carried out to determine the centrality of gold nuclei collisions under the conditions of the MPD-NICA experiment (11 GeV per nucleon) through the multiplicity in the beam monitoring detector (BeBe, beam-beam monitoring detector) designed by the MexNICA collaboration at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) in Dubna, Russia. These studies make up this thesis work of the Master of Science (Physics) program under the direction of Dra. Maria Elena Tejeda-Yeomans. Part of this work took place in a research internship under the supervision of Dr. Oleg Rogachevsky at the JINR High Energy Laboratory facilities. As complementary activities, there was a participation in the programming and analysis of a miniBeBe trigger system (inner beam monitoring detector) for the same experiment, in the MPDROOT framework. Moreover, there was participation in the preparation of an MPDROOT manual regarding the installation of the detectors proposed by MexNICA, as well as the manipulation of said software. This manual is in the annex. Besides, there was a contribution to the creation and updating of the dedicated MPD-NICA experiment repository for the development of BeBe and mini-BeBe in the MPDROOT software. Among the studies derived from this work, there was a contribution to an article from the MexNICA collaboration on BeBe.

Keywords— centrality, multiplicity, MPD-NICA, MexNICA.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis ha sido posible gracias al apoyo de varias personas.

A mi profesora Maria Elena, por permitirme seguir aprendiendo de ella, por su guía, paciencia y por la inspiración que nunca faltó para continuar en este camino.

Al Dr. Jorge Gaspar, por su disposición a ayudarme desde el comienzo de este trabajo.

A la colaboración MexNICA, especialmente al Dr. Mario Cahuantzi, por su guía durante el principio de mis estudios de centralidad, y por sus observaciones a este trabajo.

A Pedro González, por su guía con la programación.

A Calcáneo, de quien no solamente he aprendido sobre la física y la vida, sino he desaprendido.

A Oleg y a su grupo, por recibirme durante mi estancia de investigación en el JINR.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca para realizar mis estudios de maestría y por la beca de movilidad para hacer la estancia de investigación en el JINR.

A mis amigos.

A Rosa Luz, por acompañarme durante este camino y por todo el apoyo.

A mi familia, especialmente a mi madre y a mi padre, por siempre confiar en mí y por su apoyo incondicional hasta ahora, y por lo que viene.

Esta tesis fue escrita con \LaTeX 2 ϵ . Usa el formato *Clean Thesis* desarrollado por Ricardo Langer. El formato puede ser descargado en <http://cleantesis.der-ric.de/>.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Centralidad: caracterizando la región de interacción	7
2	DETERMINACIÓN DE CENTRALIDAD MEDIANTE MULTIPLICIDAD Y EL MODELO MONTE CARLO GLAUBER	12
2.1	Clases de centralidad y su relación con cantidades geométricas	12
2.2	El modelo Monte Carlo Glauber	15
2.3	Ajuste de la distribución de multiplicidad con la distribución binomial negativa	16
2.4	Producción de partículas en la simulación	20
2.5	Estudios previos del detector: correlación entre multiplicidad de partí- culas cargadas y cantidades geométricas de la colisión	22
3	EXPERIMENTO MPD-NICA Y CARACTERIZACIÓN DE BEBE EN MPDROOT	23
4	RESULTADOS: ESTUDIO DE CENTRALIDAD MEDIANTE LA MULTIPLICI- DAD EN BEBE	36
4.1	Clases de centralidad	39
4.2	Distribución Binomial Negativa	47
5	CONCLUSIONES	58
6	GLOSARIO	61
7	ANEXO	64
7.1	UrQMD	65
7.2	Modelo Glauber	66
7.2.1	TGlauberMC: Modelo Monte Carlo Glauber en ROOT	70

7.3	Distribución Binomial Negativa	71
7.3.1	Distribución de multiplicidad descrita por la NBD	72
7.4	Prueba χ^2 : ¿Qué tan bueno es el ajuste?	73
7.5	A brief guide to MPDROOT	74
7.6	Clases de centralidad: análisis para otros sistemas	81
7.6.1	Eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$	81
7.6.2	Eventos de colisiones $Bi + Bi$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$	82
7.6.3	Eventos de colisiones $Bi + Bi$ a $\sqrt{S_{NN}} = 9 \text{ GeV}$	84
7.7	Macros para estudios de centralidad	84
	BIBLIOGRAFÍA	89
	Índice de figuras	93
	Índice de cuadros	103

INTRODUCCIÓN

El plasma de quarks y gluones (QGP, Quark-Gluon Plasma) es un estado de la materia nuclear en el cual los constituyentes elementales de los núcleos, los quarks y los gluones, se encuentran libres. El QGP existe en condiciones de temperatura y densidad muy altas que estuvieron presentes durante muy poco tiempo después del Big Bang (después de 10 microsegundos y su temperatura era más alta que 150 MeV [1]). También se encuentra en estrellas de neutrones, y ha sido creado en algunos laboratorios del mundo en distintas condiciones. A pesar de que este plasma se ha creado en distintos experimentos, el entendimiento de sus propiedades es aún pobre [2]. La física de iones pesados permite estudiar esta materia en condiciones extremas de temperatura y densidad [3]. Dichas condiciones también han sido observadas en colisiones de sistemas más pequeños tales como colisiones *protón-protón* [4]. Las distintas fases del agua (H_2O) se conocen a detalle: hielo, líquido y vapor. El agua se encuentra como hielo a presión atmosférica y a una temperatura menor al punto de congelación, 0° C . Por otra parte, se encuentra como líquido entre 0° C y 100° C . Así mismo, se encuentra como vapor arriba del punto de ebullición de 100° C . La temperatura del agua puede incrementarse mediante calor, es decir, agregándole energía. Cuando el agua alcanza sus puntos de fusión o ebullición, se necesita de calor adicional para incrementar su temperatura. Por ejemplo, durante el proceso de ebullición, al añadir más calor, más líquido pasa a vapor, de modo que mientras aún quede agua líquida,

la fase gaseosa y líquida coexisten. A pesar de seguir añadiendo calor, la temperatura permanece a $100^\circ C$, y no aumentará hasta que todo el líquido se haya convertido en vapor. Este tipo de transición entre dos fases con un calor latente y la coexistencia de fases se llama transición de fase de primer orden. Al incrementar la presión, la temperatura de ebullición del agua incrementa hasta alcanzar el punto crítico a una presión de $22.1 MPa$ (218 veces la presión atmosférica), y una temperatura de $374^\circ C$. En ese momento, la coexistencia de fase desaparece, y la transición de fase se hace continua o de segundo orden.

El comportamiento anterior se aprecia en el diagrama de fase de agua de la figura (1). El diagrama muestra que el hielo puede pasar a estado líquido con el aumento de presión. Así, este diagrama puede usarse para predecir el estado del agua a cualquier temperatura y presión. Las relaciones matemáticas que permiten determinar dichos valores se conocen como ecuaciones de estado del agua [5].

Del mismo modo que el estado de una colección de átomos o moléculas depende de la temperatura y presión, el estado de un núcleo depende de la temperatura y densidad de sus nucleones. En estados de bajas energías, los núcleos muestran características tipo líquida, y tienen una densidad de $0.17 \text{ nucleones}/fm^3$. Donde $1 fm$ es igual a $1 \times 10^{-15} m$. En unidades más convencionales, la densidad nuclear es equivalente a $2.7 \times 10^{17} kg/m^3$.

La única forma posible de calentar un núcleo a temperaturas que permitan la formación del QGP en un laboratorio, es colisionándolo con otro núcleo, resultando en energías del orden de $100 MeV$, es decir, más de 200 millones de veces la temperatura de la superficie del Sol ($5500 K$), donde $1 MeV$ corresponde a una temperatura de $1.2 \times 10^{10} K$. En este trabajo, las colisiones entre núcleos del mismo tipo se indican con $A + A$, donde A es el número de nucleones que los componen. Otros sistemas, como colisiones entre protones se señalan de la forma $p + p$, y colisiones entre núcleos y protones se muestran como $p + A$. Así como el agua, el núcleo sufre una transición

de fase de primer orden, y se espera una coexistencia de distintas fases de materia nuclear en un determinado punto crítico. Diversos experimentos intentan determinar cuáles son los valores de densidad y temperatura en los cuales el punto crítico de materia nuclear está localizado [5].

La ecuación de estado de materia nuclear es importante para el entendimiento de una gran variedad de fenómenos en física nuclear y astrofísica [6]. Explorar dicha ecuación, así como las transiciones de fase conlleva ciertas dificultades, pues solamente es posible establecer las condiciones de temperatura y densidad necesarias mediante colisiones de iones pesados relativistas; por lo cual no es posible preparar cuidadosamente una muestra a una presión, temperatura y densidad del mismo modo que cuando se estudia el diagrama fase del agua. En cambio, se tiene solamente un intervalo de 10^{-21} segundos para llevar a cabo el experimento. Además, la densidad y temperatura de la muestra no permanecen constantes, pues ésta se expande y se enfría durante el experimento [5]. En la figura (2) se ve un esquema del diagrama fase de la materia nuclear donde se encuentran dos puntos críticos: de temperatura T_c y densidad de energía N_c , en los cuales coexisten los estados de materia nuclear hadrónica y QGP. Además se muestra una curva que indica la transición de fase entre dichos estados [2].

El proyecto NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) es un experimento en construcción en el JINR (Joint Institute for Nuclear Research) en Dubná, Rusia. Diseñado para estudiar las propiedades de la materia nuclear en un rango de energía que no ha sido explorado y se espera que permitirá estudiar la transición de fase entre QGP y materia puramente hadrónica. NICA acelerará y colisionará desde protones hasta núcleos pesados a velocidades relativistas. La primera ronda del experimento NICA se concentrará en una variedad de observables diagnósticas que han sido empleadas en otros experimentos como RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider). Los observables incluyen espectros de partículas, fluctuaciones de multiplicidad y momento transversal. El rango de energía de colisión de NICA es de 3 GeV a 11 GeV en el centro de

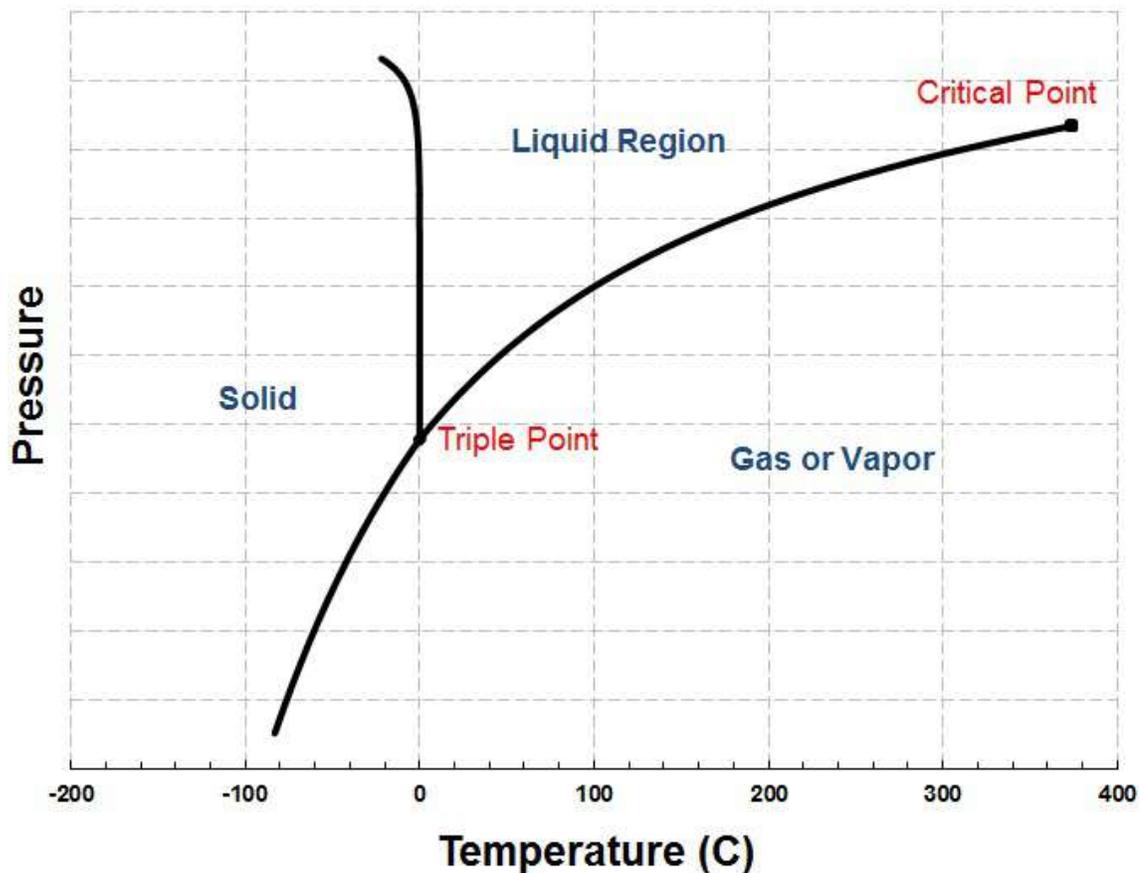


Fig. 1: Diagrama de fase en temperatura y presión del agua. Al incrementar la presión, la temperatura de ebullición del agua incrementa hasta alcanzar el punto crítico a una presión de 22.1 MPa (218 veces la presión atmosférica), y una temperatura de 374° C. En ese punto desaparece la coexistencia de fases, y la transición se hace continua o de segundo orden. Se nota que el hielo puede pasar a estado líquido con el aumento de presión. Este diagrama obtenido de la página web de ChemicalLogic [7].

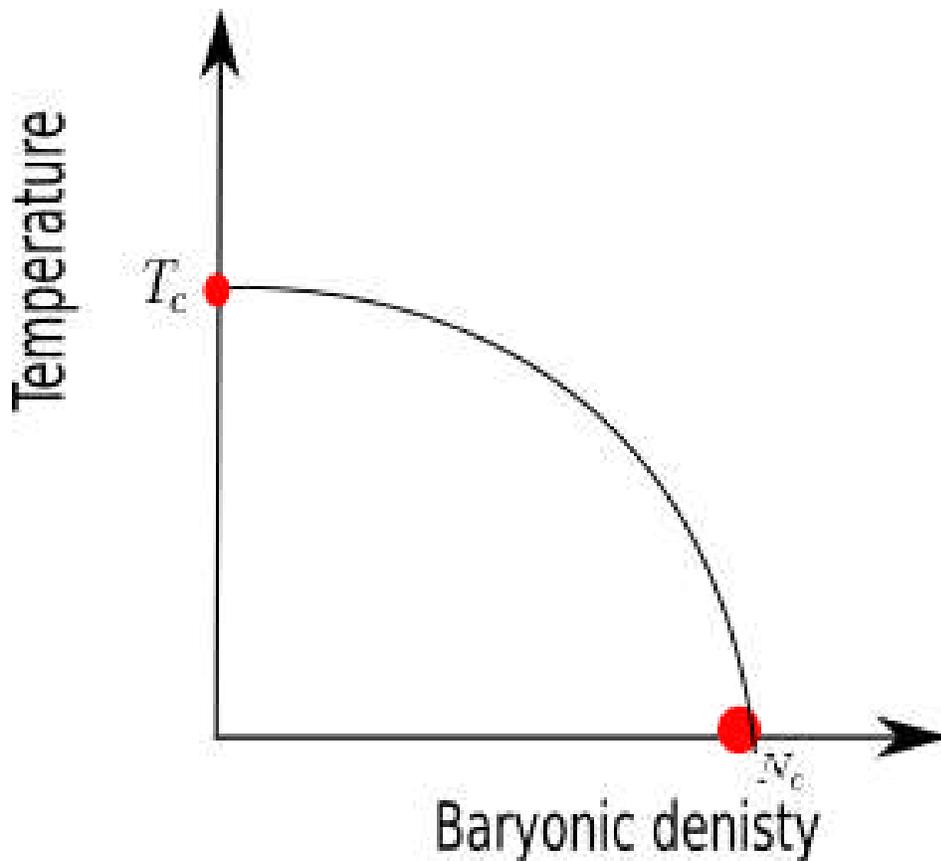


Fig. 2: Bosquejo de diagrama de fases de la materia nuclear. Se muestran dos puntos críticos: de temperatura T_c y de densidad N_c , en los cuales ocurren las transiciones de fase entre los estados de materia nuclear hadrónica y el QGP. La línea curva entre los puntos críticos indica la región de transición de fase, donde la región de bajas temperaturas y densidades corresponde a la fase hadrónica y la región de altas temperaturas y densidades corresponde a la fase de QGP.

masa de la colisión, donde uno de los puntos de interacción para los estudios de iones pesados se encuentra en el MPD (Multi Purpose Detector) [2]. El detector MPD se está construyendo para formar parte del experimento NICA. MPD estará conformado por un arreglo de detectores que permitirán estudiar las observables físicas de las partículas producidas en las colisiones de NICA [8].

La colaboración MexNICA está trabajando en el diseño de un detector de monitoreo de haz llamado BeBe (Beam-beam monitoring detector) para formar parte del detector MPD. BeBe permitirá la optimización en la reconstrucción de observables físicas

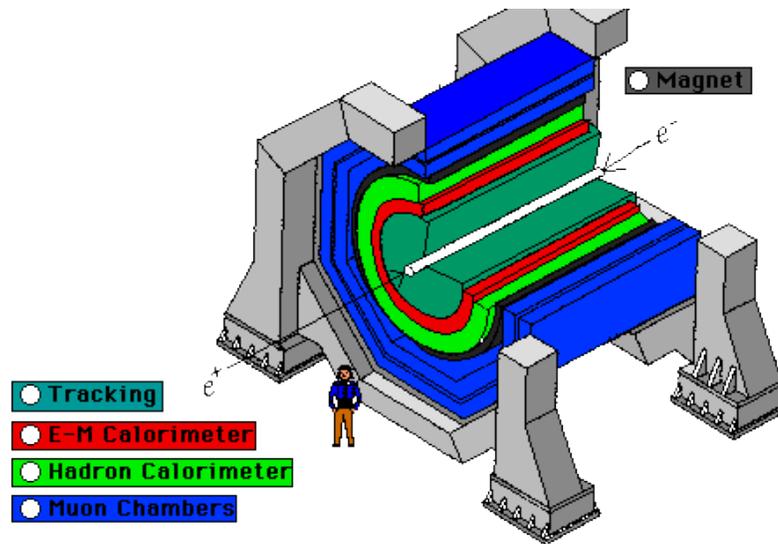


Fig. 3: Elementos básicos de los detectores actuales. Los detectores contemporáneos se conforman de un arreglo de detectores estructurados de acuerdo a las partículas de interés a capturar; de modo que cuando las partículas alcanzan al detector, dejan su firma en él mediante las interacciones que sufren o no en cada una de sus componentes. Las componentes básicas son la cámara de trayectoria, el calorímetro electromagnético (EM), el calorímetro hadrónico y la cámara de muones [9].

claves como la multiplicidad [3], que es el número de partículas cargadas capturadas por el detector.

Los experimentos de altas energías se conforman de un arreglo de detectores estructurados de acuerdo a las partículas de interés a capturar; de modo que cuando las partículas alcanzan el detector, dejan su firma en él mediante las interacciones que sufren o no sufren en cada una de sus componentes. Las componentes básicas son la cámara de trayectoria, el calorímetro electromagnético (ECAL, de sus siglas en inglés Electromagnetic Calorimeter), el calorímetro hadrónico (HCAL, de sus siglas en inglés Hadron Calorimeter) y la cámara de muones (3). Las cámaras de trayectoria describen las trayectorias de las partículas con carga eléctrica que pasan a través de ellas. Los calorímetros están diseñados para que las partículas a detectar depositen toda su energía en ellos, por lo cual terminan deteniéndose en el respectivo detector. El ECAL está diseñado para medir la posición espacial y la energía de electrones y fotones. El calorímetro hadrónico mide la energía que los hadrones depositan en él.

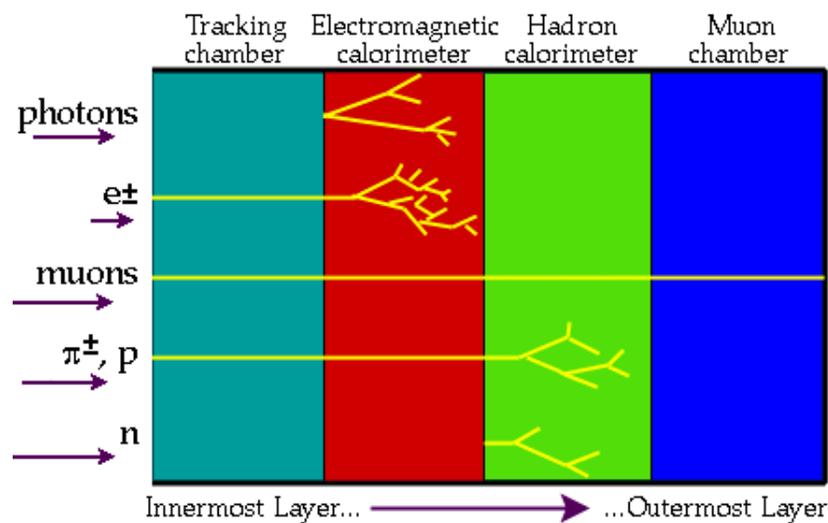


Fig. 4: Los calorímetros están diseñados para que las partículas a detectar depositen toda su energía en ellos, por lo cual se detienen por completo en el respectivo detector. Los diagramas indican que el material del que están hechos los calorímetros son tales que las partículas que entran sufren decaimientos [10].

Los muones son partículas que interactúan en menor grado con la materia por lo cual los calorímetros anteriores no son suficientes para su identificación. Este fin lo cumple la cámara de muones, la cual es una cámara de trayectoria diseñada para que los muones dejen las trazas de sus trayectorias. En la figura (4) se muestran los cuatro tipos de detectores básicos con las firmas que distintas partículas dejan en ellos. En los calorímetros se encuentran diagramas de las partículas que decayeron en ellos.

1.1 CENTRALIDAD: CARACTERIZANDO LA REGIÓN DE INTERACCIÓN

Las propiedades fundamentales del plasma de quarks y gluones son reflejadas en sus observables globales, como la multiplicidad de partículas producidas y el momento transversal promedio. El conocimiento de las condiciones iniciales en colisiones $A + A$ es importante para analizar procesos que llevan a la formación de este plasma y su respectiva hadronización [11].

Las propiedades de la materia formada después de la colisión dependen de varios factores, como la energía inicial de la colisión y la centralidad, que está relacionada con la región de traslape de los núcleos que colisionan [12]. El volumen de la región de interacción depende del parámetro de impacto b de la colisión, definido como la distancia entre los centros de dos núcleos que colisionan, tal y como se ve en la figura (5) [13]. De este modo, el tamaño y la forma transversal de la región de interacción es determinada por el parámetro de impacto. Colisiones centrales, es decir a pequeños parámetros de impacto, llevan a regiones de interacción grandes, mientras que en colisiones periféricas, en las cuales el parámetro de impacto es mayor, producen regiones de interacción pequeñas. En los experimentos, el parámetro de impacto es una cantidad determinada a través de una observable, denotada usualmente como N . Dependiendo del experimento, esta cantidad medida N es el número de partículas cargadas (multiplicidad) capturadas en un detector, o la energía transversal depositada en un calorímetro. La idea es que colisiones con un parámetro de impacto pequeño producen altas multiplicidades, y colisiones con un parámetro de impacto grande producen multiplicidades pequeñas. La relación entre N y b es usualmente obtenida a partir de un modelo de la colisión, como HIJING (Heavy Ion Jet INteraction Generator), o con el modelo Glauber de dos componentes acoplado a un modelo simple de producción de partículas. Los parámetros de estos modelos son ajustados para reproducir la distribución de multiplicidad medida en el detector. Estos modelos ofrecen una buena parametrización, sin embargo no describen la dinámica de la colisión [14].

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 [14] le llaman *centralidad- b* a la determinada respecto al parámetro de impacto.

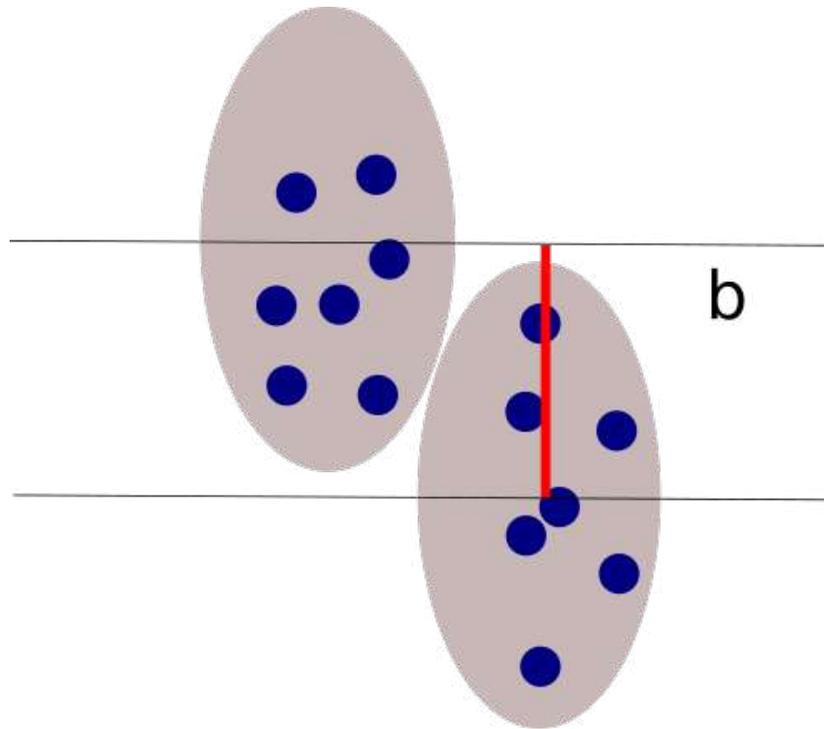


Fig. 5: Colisión entre el núcleo proyectil y el núcleo objetivo con un parámetro de impacto b entre sí.

La centralidad es una propiedad geométrica crucial para la interpretación de datos experimentales de colisiones entre núcleos. Una resolución fina de centralidad permite reducir el impacto de fluctuaciones en observables físicas estudiadas en estos experimentos [15].

El objetivo de este trabajo de tesis es determinar la centralidad de colisiones de iones pesados relativistas mediante la multiplicidad del detector BeBe, en las condiciones del experimento MPD-NICA. En el presente trabajo se hará la revisión de dos métodos para determinar la centralidad de colisiones de iones pesados relativistas y en particular serán aplicados al experimento MPD-NICA. El capítulo 2 aborda el estudio de la centralidad mediante la multiplicidad empleando dos enfoques distintos. En el primer enfoque se obtiene información de la centralidad directamente de la simulación, mientras que en el segundo se emplea el modelo Monte Carlo Glauber acoplado a un modelo de producción de partículas. En el capítulo 3 se revisan a detalle las caracte-

rísticas del detector BeBe, y se realiza una caracterización de éste para poder realizar los estudios de centralidad. En el capítulo 4 se encuentran los resultados de determinar la centralidad mediante la multiplicidad medida en el detector *BeBe* y mediante el modelo Glauber acoplado a un modelo de producción de partículas. Finalmente, los resultados obtenidos permiten concluir sobre la capacidad del detector para estudiar la centralidad. Este estudio se está realizando de forma paralela por otros grupos de investigación del experimento MPD-NICA. Para ello han usado otros elementos del MPD como la TPC (de sus siglas en inglés, Time Projection Chamber) y el ZDC (de sus siglas en inglés, Zero Degree Calorimeter). Por lo cual, en un futuro será posible comparar los resultados.

Para realizar dichos análisis, se simularon tanto colisiones de iones pesados relativistas $Au + Au$, como la captura de las partículas en el detector BeBe, mediante UrQMD (de sus siglas en inglés, Ultra relativistic Quantum Molecular Dynamics) [16], y el software MPDROOT [17], respectivamente. UrQMD es un generador monte carlo. Los generadores simulan la producción y los decaimientos de partículas que ocurren en colisiones a altas energías. MPDROOT es un software de simulación de detectores y análisis de datos en desarrollo para el experimento MPD-NICA [18]. MPDROOT simula interacciones y partículas de interés, así como la geometría y respuesta de los detectores, materiales empleados, interacciones de partículas con materia y campos electromagnéticos, y análisis de la simulación completa en distintos niveles y visualización de los detectores. En el anexo se encuentra un ejemplo de los parámetros básicos que pueden controlarse en la simulación de UrQMD. También se desarrolla el procedimiento de instalación del detector BeBe en el software MPDROOT, así como la operación del mismo. Se pueden revisar más detalles de este software en la página web de MPD [19]. Los análisis referentes al capítulo 3 corresponden a una simulación de UrQMD de 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* (parámetro de impacto de 0 a 16 fm), a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV. Por otra parte, los resultados del capítulo 4 pertenecen a una simulación de 1,000,000 eventos de UrQMD en las mismas condi-

ciones. Para las gráficas que corresponden a distintas condiciones, se especifican sus condiciones particulares. En el glosario se enlistan expresiones empleadas a lo largo de los capítulos.

DETERMINACIÓN DE CENTRALIDAD MEDIANTE MULTIPLICIDAD Y EL MODELO MONTE CARLO GLAUBER

La centralidad es una propiedad de la colisión asociada al grado de traslape de los núcleos participantes en la interacción. Esta propiedad puede obtenerse a través de observables medidas en el experimento, tales como la multiplicidad de partículas cargadas o la energía depositada en los detectores [12]. En las simulaciones, la relación entre la multiplicidad y el parámetro de impacto se puede obtener directamente de un generador o mediante modelos de colisión en conjunto con modelos de producción de partículas. En este capítulo se revisarán las etapas de la estimación de la centralidad empleando los enfoques anteriores. También es posible extraer información sobre b sin la necesidad de emplear un modelo de colisión, bajo la consideración de que la distribución de probabilidad de N es Gaussiana para valores de b fijos. Más detalles del último enfoque pueden consultarse en la referencia [14].

2.1 CLASES DE CENTRALIDAD Y SU RELACIÓN CON CANTIDADES GEOMÉTRICAS

La centralidad es usualmente expresada como porcentaje de la sección transversal de interacción nuclear total σ . Las clases de centralidad c de colisiones $A + A$ con pará-

metro de impacto b se definen integrando la distribución de parámetro de impacto de la siguiente forma:

$$c = \frac{\int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db'}{\int_0^{b_{max}} \frac{d\sigma}{db'} db'} = \frac{1}{\sigma_{AA}} \int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db'.$$

Por un lado, es necesaria una buena determinación de la sección transversal total σ_{AA} , y por otro lado, es necesario establecer la relación entre el parámetro de impacto b y la observable, en este caso la multiplicidad N , de modo que N pueda clasificarse de acuerdo a la fracción de la sección transversal correspondiente:

$$c \approx \frac{1}{\sigma_{AA}} \int_{N^{thr}}^{N_{max}} \frac{d\sigma}{dN} dN,$$

donde N^{thr} es el valor más bajo de multiplicidad para una clase dada y N_{max} es la multiplicidad máxima [13, 20].

Los percentiles de sección transversal hadrónica pueden ser determinados para cualquier valor de la multiplicidad medida en el detector [13]. Con una distribución medida y simulada de multiplicidad, puede hacerse el mapeo entre las clases para obtener los valores medios de la cantidades geométricas de las colisiones. Si por ejemplo se tienen histogramas uni-dimensionales de las distribuciones medidas y simuladas; se calcula la integral para cada uno de los histogramas, y se definen las clases de centralidad en términos de la fracción total de la integral. La integración se realiza típicamente desde los valores grandes de N hasta los pequeños. Por ejemplo, las clase de centralidad 10 – 20 % se define por los límites n_{10} y n_{20} que satisface:

$$\frac{\int_{N_{max}}^{N_{10}} \frac{dN_{ev}}{dN} dN}{\int_{N_{max}}^0 \frac{dN_{ev}}{dN} dN} = 0.1,$$

y

$$\frac{\int_{N_{max}}^{N_{20}} \frac{dN_{ev}}{dN} dN}{\int_{N_{max}}^0 \frac{dN_{ev}}{dN} dN} = 0.2.$$

O para cualquier clase:

$$\frac{\int_{N_{max}}^{N_i} \frac{dN_{ev}}{dN} dN}{\int_{N_{max}}^0 \frac{dN_{ev}}{dN} dN} = c_m, \quad (1)$$

[21].

Si se tiene una distribución de multiplicidad de partículas cargadas determinada evento por evento dN_{ev}/dN , y la integral total de la distribución es conocida, donde N es la multiplicidad y N_{ev} es el número de eventos. La centralidad se determina dividiendo dicha distribución en distintas clases, correspondientes a una fracción del número total de partículas, empezando con el valor mayor de N . Las clases de multiplicidad están conectadas con la centralidad de las colisiones, por lo cual, es común referirse a ellas como clases de centralidad. La conexión con las condiciones iniciales de la colisión como el parámetro de impacto b o el número de nucleones participantes N_{par} (el número de nucleones que intervienen en una colisión), se hace con modelos como el Glauber, que se revisará brevemente en este capítulo y de una forma más detallada en el anexo [12]. Para ello, se definen las clases de centralidad en distribuciones medidas y calculadas; luego se mapean los valores medios para las mismas clases de ambas distribuciones. Los detalles del procedimiento de mapeo entre ambas distribuciones varían dependiendo del experimento y los sistemas de colisión. Desde el punto de vista experimental, se usa el concepto de centralidad como el criterio para dividir y analizar datos. Por otra parte, es posible simular observables experimentales como la multiplicidad de partículas cargadas y aplicar cortes de centralidad del mismo modo que en el análisis de datos reales [21].

2.2 EL MODELO MONTE CARLO GLAUBER

El modelo Glauber estudia las colisiones de los núcleos en términos de las colisiones individuales de los nucleones que les componen, donde los nucleones que colisionan se conocen como participantes N_{par} , N_{col} es el número de colisiones que sufren, y los nucleones que no interaccionan son llamados espectadores N_{esp} [21].

En el enfoque Monte Carlo se prepara un modelo de los núcleos definiendo aleatoriamente las posiciones espaciales de los nucleones en cada uno de los núcleos. El procedimiento Monte Carlo Glauber se resume en los siguientes pasos:

1. La coordenada radial del nucleón es muestreada de forma aleatoria por la distribución $4\pi r^2 \rho(r)$ y ρ es determinada por la condición de normalización $\int \rho(r) d^3r = A$. Además se requiere una distancia de exclusión d_{min} de esferadura entre los centros de los nucleones, es decir, dentro del núcleo no debe haber nucleones con una distancia de separación menor a d_{min} .
2. Se simula la colisión nuclear con un parámetro de impacto aleatorio. El valor máximo del parámetro de impacto se escoge lo suficientemente grande para simular las colisiones hasta que la probabilidad de interacción es cero.

La colisión entre los núcleos se describe como una secuencia de colisiones binarias nucleón-nucleón independientes, donde los nucleones toman una trayectoria recta y las secciones transversales nucleón-nucleón inelásticas son independientes del número de colisiones que los respectivos nucleones sufrieron antes, es decir, se usa la misma sección transversal para todas las colisiones sucesivas. Se considera que dos nucleones de distintos núcleos interaccionan si la distancia relativa entre sus centros es menor a la distancia correspondiente a la sección transversal nucleón-nucleón inelástica $d < \sqrt{\sigma_{NN}^{inel}}/\pi$ [13].

Este enfoque es consistente con sistemas de colisiones $p + A$ y $A + A$, y es especialmente útil para comparar datos de distintos experimentos, sistemas de colisión y cálculos teóricos. Así, una vez determinadas las clases de centralidad, con la simulación del modelo Glauber se obtiene N_{par} y N_{col} para cada una. En el anexo se describen más detalles del modelo Glauber.

La producción de partículas en las colisiones de los distintos sistemas están relacionados con N_{par} y N_{col} , de modo que se han propuesto modelos que reproducen la multiplicidad de acuerdo a estas cantidades. Para ello se introduce el concepto de *antecesores*, como las fuentes de producción de partículas. En la siguiente sección se revisará esta idea.

2.3 AJUSTE DE LA DISTRIBUCIÓN DE MULTIPLICIDAD CON LA DISTRIBUCIÓN BINOMIAL NEGATIVA

La distribución de multiplicidad de la figura (6) tiene la forma típica. Dicha distribución corresponde al número de eventos para cada valor de multiplicidad. Las distribuciones de multiplicidad suelen tener un pico en la región de multiplicidades cercanas a 0, que corresponde a los eventos de colisiones más periféricas. Luego permanecen aproximadamente constantes para multiplicidades asociadas a eventos semiperiféricos y semicentrales, para finalmente decaer de forma abrupta con las colisiones más centrales [13].

Se ha comprobado que la distribución binomial negativa puede reproducir distribuciones de multiplicidad para un amplio rango de energías. De esta forma, la multiplicidad producida por una colisión nucleón-nucleón es parametrizada por la distribución

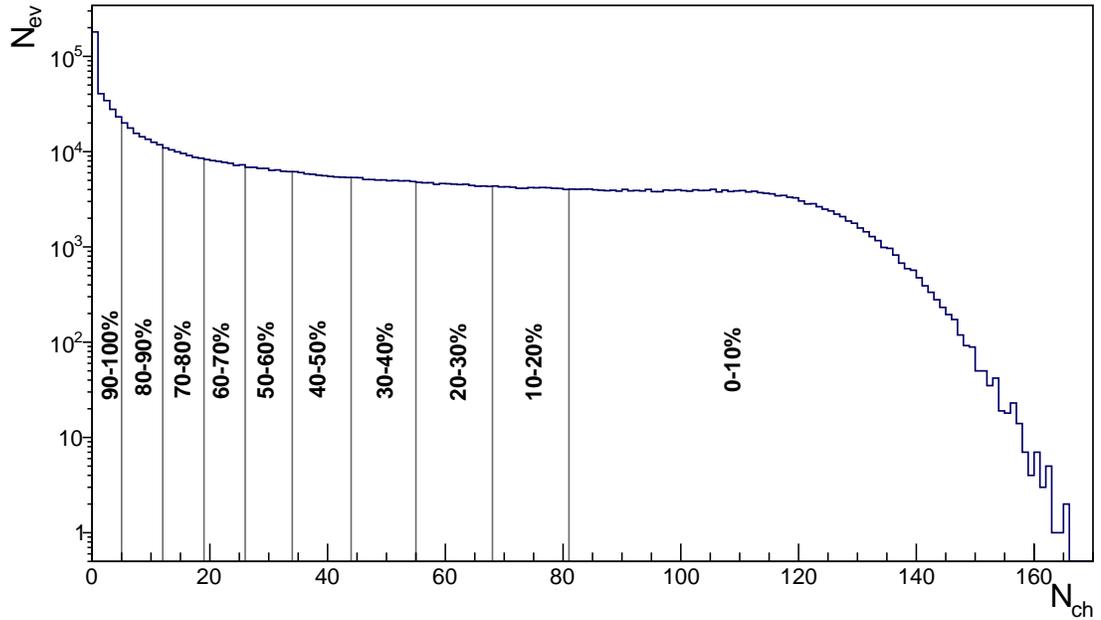


Fig. 6: Distribución de multiplicidad con la forma típica con las clases de centralidad indicadas. Presenta un pico en la región de multiplicidades cercanas a 0, que corresponde a los eventos de colisiones más periféricas (centralidad 100 %). Luego permanece aproximadamente constante para multiplicidades de 10 a 120 y finalmente decae drásticamente para los eventos de las colisiones más centrales (centralidad 0 – 10 %).

binomial negativa, que da la probabilidad de medir n partículas cargadas por antecesor:

$$P(n) = \frac{\Gamma(n+k)}{\Gamma(n+1)\Gamma(k)} \frac{(\mu/k)^n}{(\mu/k+1)^{n+k}} \quad (2)$$

donde μ es la multiplicidad media por antecesor y k es un parámetro de dispersión. Para aplicar este modelo a cualquier colisión con un valor dado de N_{par} y N_{col} , se introduce el concepto de *antecesores*, como las fuentes de producción de partículas.

Se asume que el número de antecesores N_{an} puede ser parametrizado por la siguiente expresión:

$$N_{an} = fN_{par} + (1 - f)N_{col}. \quad (3)$$

La ecuación anterior considera colisiones núcleo-núcleo de interacciones blandas y duras, donde las interacciones blandas producen partículas con una multiplicidad promedio proporcional a N_{par} , y la probabilidad de que ocurran interacciones duras es proporcional a N_{col} . Para obtener la multiplicidad promedio simulada por evento, la distribución binomial negativa muestrea una cantidad de veces igual al número de antecesores de acuerdo a la siguiente ecuación

$$P(n)_{ev} = \sum_1^{N_{an}} N_{an} \times P(n). \quad (4)$$

La distribución de multiplicidad es simulada para un ensemble de eventos y para varios valores de los parámetros de la distribución binomial negativa μ , k , y el parámetro f de N_{an} [13, 22]. Además, se aplica un método de minimización para encontrar los valores de los parámetros que resulten con la menor χ^2 . El número de antecesores es determinado por la función de dos componentes N_{an} (3), sin embargo, otras consideraciones pueden llevar a distintas parametrizaciones. La dependencia de los antecesores en N_{par} y N_{col} viene de una parametrización de la dependencia de la multiplicidad de partículas cargadas con N_{par} y N_{col} . De este modo, suelen proponerse modelos que dependen exclusivamente de N_{par} o N_{col} dependiendo de las condiciones del experimento. La multiplicidad de partículas cargadas suele ser proporcional a N_{par} en escenarios dominados por procesos blandos. En este caso, se asume que todos los nucleones participantes contribuyen con la misma cantidad de energía a la producción de partículas, y la proporción con N_{par} es aproximadamente lineal. Por otra parte, la multiplicidad es proporcional a N_{col} en colisiones nucleares en un ré-

gimen de energía donde dominan los procesos duros sobre los blandos. Los modelos que contienen estas dos componentes se usan para cuantificar la importancia relativa de los procesos blandos y duros en los mecanismos de producción de partículas a distintas energías. Para determinar la proporcionalidad de la producción de partículas, se sugiere estudiar la multiplicidad de las partículas cargadas $dN/d\eta$ en función del número de participantes N_{par} y del número de colisiones N_{col} [13].

El procedimiento para determinar la centralidad mediante la distribución binomial negativa y el modelo Glauber se resume en el siguiente algoritmo:

1. Se construye el histograma de multiplicidad que posteriormente será ajustado.
2. Se normaliza el histograma del paso anterior.
3. Se establecen valores preliminares para los parámetros k y f . Usando como guía los valores reportados en la literatura para eventos de colisiones $Au + Au$ a $11GeV$.
4. N_{par} y N_{col} obtenidos con la simulación del modelo Glauber se dan de entrada.
5. Para cada evento se calcula el número de antecesores mediante la expresión (3).
6. La NBD se muestrea un número de veces igual al número de antecesores y el número de partículas producidas se suma.
7. La multiplicidad media por antecesor (parámetro μ) es estimada preliminarmente de la forma: $\mu = \frac{M^{max}}{N_{an}^{max}}$, donde M^{max} es la multiplicidad máxima en el histograma de entrada y N_{an}^{max} es el número de antecesores máximo evaluado con los valores de N_{par} y N_{col} obtenidos en la simulación con el modelo Glauber.
8. Para los valores dados de f , k y μ en una región de multiplicidad se calcula el valor de χ^2 .

9. Se aplica un procedimiento de minimización para encontrar los valores de los parámetros f y k que correspondan a una χ^2 mínima [13, 23].

La diferencia entre los puntos 3 y 9 reside en que para el último caso los valores de los parámetros son tales que la χ^2 es mínima. Un análisis complementario para localizar el valor mínimo de la χ^2 y los correspondientes valores de f y k consiste en explorar el espacio fase de dos dimensiones (f, k) .

2.4 PRODUCCIÓN DE PARTÍCULAS EN LA SIMULACIÓN

En este capítulo se vio que el modelo Monte Carlo Glauber permite describir las condiciones iniciales de las colisiones entre los núcleos y por otra parte, la distribución binomial puede describir la producción de partículas. Después de que los núcleos colisionan, la materia nuclear se encuentra a una alta temperatura y al enfriarse suceden una gran variedad de procesos de producción de partículas, siendo éste uno de los problemas centrales de la física de partículas elementales. Los aceleradores modernos han hecho posibles estudios detallados sobre este fenómeno en un amplio intervalo de energía. Hay una gran variedad de modelos teóricos que tienen diferentes características físicas y están basados en distintos conceptos. Sin embargo, aún no existe una descripción completa de este fenómeno [24, 25].

Los modelos Monte Carlo, o los cálculos teóricos pueden ser categorizados de distintas formas. Por ejemplo, de acuerdo a sus aplicaciones en distintos rangos de energías. Algunos códigos Monte Carlo están basados en principios y teorías como la cromodinámica cuántica, otros tienen consideraciones fenomenológicas y aproximaciones de acuerdo a los datos experimentales. Hay modelos que enfatizan los fenómenos colectivos, como los modelos hidrodinámicos y termodinámicos. La clasificación de dichos modelos puede hacerse también considerando el estado de evolución de la colisión

en el cual el modelo se concentra. Hay modelos de estados iniciales, como el Glauber, modelos de interacciones partónicas y modelos de expansión hidrodinámica, por mencionar algunos ejemplos. Los modelos híbridos incluyen más de uno de los enfoques mencionados anteriormente, resultando útiles para tener una visión más realista de las distintas etapas de la colisión nuclear [25].

Para este trabajo de tesis se empleó el generador UrQMD, el cual se encuentra en la categoría de modelos microscópicos. Este generador incluye muchos parámetros desconocidos que son establecidos por resultados de datos experimentales o por consideraciones del modelo. Además trata interacciones hadrónicas y partónicas [25]. UrQMD estudia la fenomenología de interacciones hadrónicas a bajas e intermedias energías (menores a 5 GeV) en términos de las interacciones entre los hadrones y sus resonancias. A energías más altas (mayores a 5 GeV), domina la fragmentación en hadrones en la producción de múltiples partículas. Cabe destacar que este modelo es congruente con una basta cantidad de datos experimentales [26]. El modelo UrQMD representa una solución Monte Carlo de una gran cantidad de ecuaciones parciales acopladas integral-diferenciales para el tiempo de evolución de varias densidades del espacio fase. UrQMD es un generador complejo y pueden revisarse sus detalles en distintos artículos [25, 26], así como en su página web [16].

UrQMD puede simular colisiones de distintos sistemas y condiciones, de modo que permite simular condiciones similares a las del experimento MPD-NICA. En la simulación se tiene control de parámetros importantes como los sistemas que colisionan, la energía, el rango del parámetro de impacto y el número de eventos. En el anexo se encuentra un ejemplo de un archivo de entrada para una simulación con UrQMD.

2.5 ESTUDIOS PREVIOS DEL DETECTOR: CORRELACIÓN ENTRE MULTIPLICIDAD DE PARTÍCULAS CARGADAS Y CANTIDADES GEOMÉTRICAS DE LA COLISIÓN

La producción de partículas varía ampliamente dependiendo de la región de pseudorapidez η (consultar definición de η en el glosario). La mayoría de las partículas se producen en la región central del espacio de pseudorapidez. En colisiones nucleares no centrales, se distingue a los participantes y los espectadores. Los espectadores no colisionan y producen partículas que serán detectadas. Las partículas cargadas, ya sea individuales o en fragmentos nucleares, continúan su trayectoria, hasta que se ven afectados por el campo magnético del imán del experimento. Por otra parte, las partículas neutras continúan sin ser desviados e impactan los calorímetros, localizados estratégicamente con este propósito. Para estudiar la capacidad de un detector de reconstruir las propiedades geométricas de las colisiones, tales como el parámetro de impacto y el número de participantes, se puede simular tanto la producción de partículas, como su interacción con el respectivo detector. De esta manera es posible verificar que hay una relación aproximadamente lineal entre las cantidades geométricas y la señal simulada. Cuando no hay una correlación, significa que dicha región de pseudorapidez no puede ser usada para estudiar la centralidad [20].

En el siguiente capítulo se estudiará a detalle la correlación entre el parámetro de impacto de las colisiones $Au + Au$ y la multiplicidad de las partículas cargadas capturadas por BeBe. Para ello, se simulará la producción de partículas con el generador UrQMD y el detector BeBe con el software MPDROOT. En *BeBe*, las regiones de pseudorapidez se traducen a los distintos anillos, por lo cual se considerará el número de partículas capturadas por cada uno de éstos.

EXPERIMENTO MPD-NICA Y CARACTERIZACIÓN DE BEBE EN MPDROOT

BeBe fue propuesto para proveer una señal de *trigger*, así como para estudios de centralidad y del plano del evento en colisiones $A + A$. Este detector está basado en el espíritu de BBC (Beam-Beam Counter) que fue inicialmente descrito en el reporte conceptual de MPD. Bajo ciertas condiciones, BeBe proveerá información importante en colisiones $p + A$ y $p + p$, de modo que complementará a FFD (Fast Forward Detector) y a HCAL. Las celdas de BeBe serán acopladas directamente a los foto multiplicadores de silicio. La geometría propuesta está relacionada con la usada en el experimento PHENIX-RHIC [27]. Los detectores hechos de material centellador son usados en experimentos de altas energías para detectar partículas cargadas. La elección común del material centellador es plástico o cristal [28]. Diversas geometrías y materiales se han puesto a prueba para conformar a BeBe.

El *trigger* es un sistema que mediante una serie de criterios simples decide rápidamente qué eventos deben almacenarse para análisis posteriores. Estos sistemas son importantes debido a las limitaciones en los almacenamientos de datos. Los *triggers* aprovechan la simetría de los detectores, puesto que puede recolectarse información equivalente en distintas partes del detector. Estos sistemas se dividen en niveles, de modo que cada nivel selecciona datos para ser llevados al siguiente nivel, en el cual

habrá más tiempo e información para tomar una mejor decisión [29]. BeBe debe de satisfacer diversos requerimientos para ser considerado *trigger*, como la resolución temporal. Para fungir de *trigger* de la cámara de proyección temporal (TPC, de sus siglas en inglés) en colisiones de bajas multiplicidades ($p + p$ y $p + A$), se espera que su resolución debe ser alrededor de 30 ps . Además, para cumplir los requerimientos de *trigger*, la geometría de BeBe consiste en dos detectores hexagonales que serán colocados transversalmente a 2 m y a -2 m del punto de interacción a lo largo del eje del haz, justo en las tapaderas de la TPC, tal y como se ve en la imagen derecha de la figura (7). Está conformado de 162 celdas hexagonales de plástico centellador, acomodadas en 6 anillos hexagonales. Cada una de las celdas hexagonales mide 5 cm de alto y 2 cm de ancho, lo cual implica un tamaño de $66 \text{ cm} \times 76 \text{ cm}$. Los fotones emitidos después de que las partículas cargadas pasan a través del detector son colectados con sensores de luz. Recientemente, se inició el diseño del detector miniBeBe (inner beam monitoring detector) para fungir de *trigger* para el MPD-NICA, junto con BeBe [30].

BeBe tiene un rango de cobertura de pseudorapidez aproximada de $2.0 < |\eta| < 4.2$, como se muestra en la figura (8). De este modo, BeBe complementará la cobertura de pseudorapidez de MPD, tal y como se ve en la figura (9). Los resultados que se muestran a continuación corresponden a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT. En la figura (10) se encuentra la distribución espacial en el plano X - Y de las partículas cargadas capturadas por BeBe y en la figura (11) se tiene la misma distribución en términos de cada uno de los anillos del detector. La intensidad en número de partículas está dada en la escala de colores. Se distingue que la intensidad es más alta en los anillos internos en comparación con el resto. En este trabajo los anillos se indican como 1, 2, ..., 6 del interior al exterior. En la tabla (1) se especifican los rangos aproximados de η correspondientes a cada uno de los anillos, los cuales serán empleados en los estudios de las simulaciones sin detector.

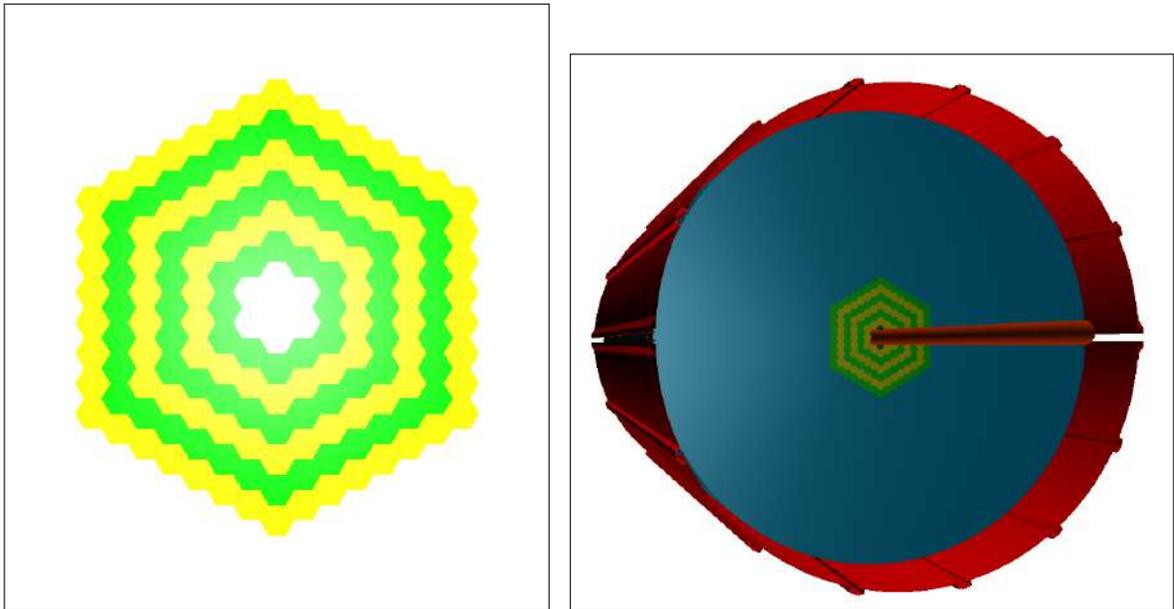


Fig. 7: En la figura izquierda se muestra la geometría propuesta para el detector BeBe. Cada detector se conforma de 162 celdas hexagonales de plástico centellador de 5 cm de altura, acomodadas en 6 anillos hexagonales. En la figura derecha se muestra al BeBe en uno de los lados de la cámara de proyección temporal.

Dichos rangos son aproximados, debido a que cubren regiones circulares cercanas a los anillos hexagonales del detector. Además, se considera que el detector se localiza a $\pm 2 m$ a lo largo de la dirección del haz.

Los datos de BeBe pueden ser usados para la reconstrucción de observables de interés en colisiones de iones pesados, como la multiplicidad de partículas cargadas, la determinación de la centralidad y la resolución del plano del evento [27].

El objetivo del presente trabajo es determinar la centralidad. Para ello primero se realizará una caracterización física de BeBe. Como es sabido, la centralidad indica el nivel de traslape entre los núcleos que colisionan, y está relacionada con la multiplicidad de partículas cargadas que son capturadas por el detector. El método para determinar la centralidad está basado en el hecho de que hay una correlación entre la multiplicidad y el parámetro de impacto. Por ello se procederá a revisar la distribución de multiplicidad, así como su correlación con el parámetro de impacto. La relación entre

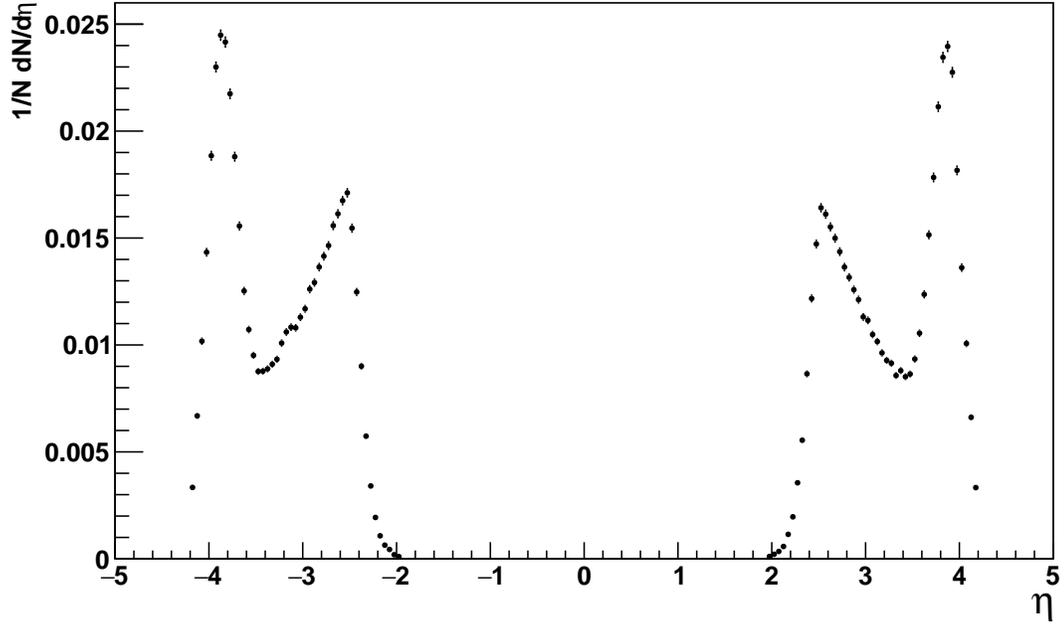


Fig. 8: Distribución de pseudorapidez de las partículas cargadas capturadas por BeBe. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.

Rangos de η de los anillos de BeBe

Anillo	$ \eta $ inferior	$ \eta $ superior
1	3.5	4.2
2	3.2	3.5
3	3.0	3.2
4	2.8	3.0
5	2.6	2.8
6	2.2	2.0

Tab. 1: Aproximación de regiones de pseudorapidez de cada uno de los anillos de BeBe. Cubren una región aproximada de $2.0 < |\eta| < 4.2$. Considerando que el detector se localiza a ± 2 m a lo largo de la dirección del haz.

Pseudorapidity charged particles. 10000 Au+Au @11GeV UrQMD.

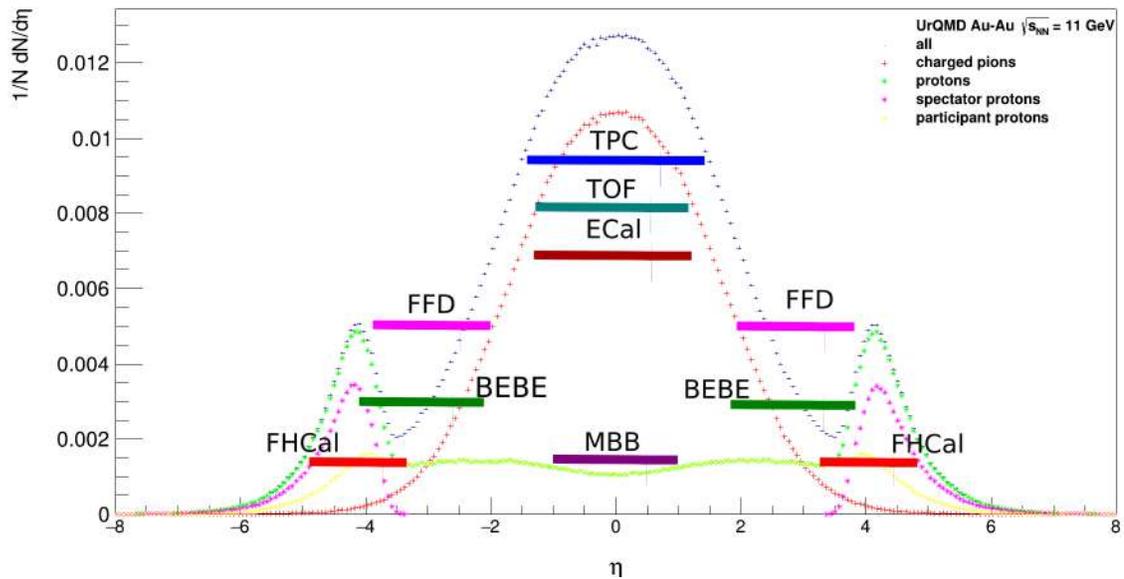


Fig. 9: Distribución de pseudorapidez de partículas cargadas. Se señala el rango de cada uno de los detectores principales de MPD. BeBe complementará el rango de pseudorapidez de MPD.

la multiplicidad y la centralidad es tal que conforme más centrales son las colisiones, más altas son las multiplicidades. De forma más específica, se espera una tendencia aproximadamente lineal en la disminución de la multiplicidad respecto al aumento del parámetro de impacto.

Como se vio en la figura (6) del capítulo anterior, la distribución típica de multiplicidad presenta un pico para de multiplicidades de 0. Luego permanece aproximadamente constante para multiplicidades asociadas a eventos semiperiféricos y semicentrales, para finalmente decaer drásticamente con las colisiones más centrales.

En la figura (12) se tiene la distribución de multiplicidad de BeBe, la cual se espera que esté correlacionada con el parámetro de impacto. La distribución incrementa para los valores de multiplicidad entre 0 y 10, luego decrece para valores de 10 a 20 y permanece constante en la región de multiplicidades de 20 a 50. Finalmente, decrece conforme las multiplicidades aumentan, desde multiplicidades de 50 a 120. El

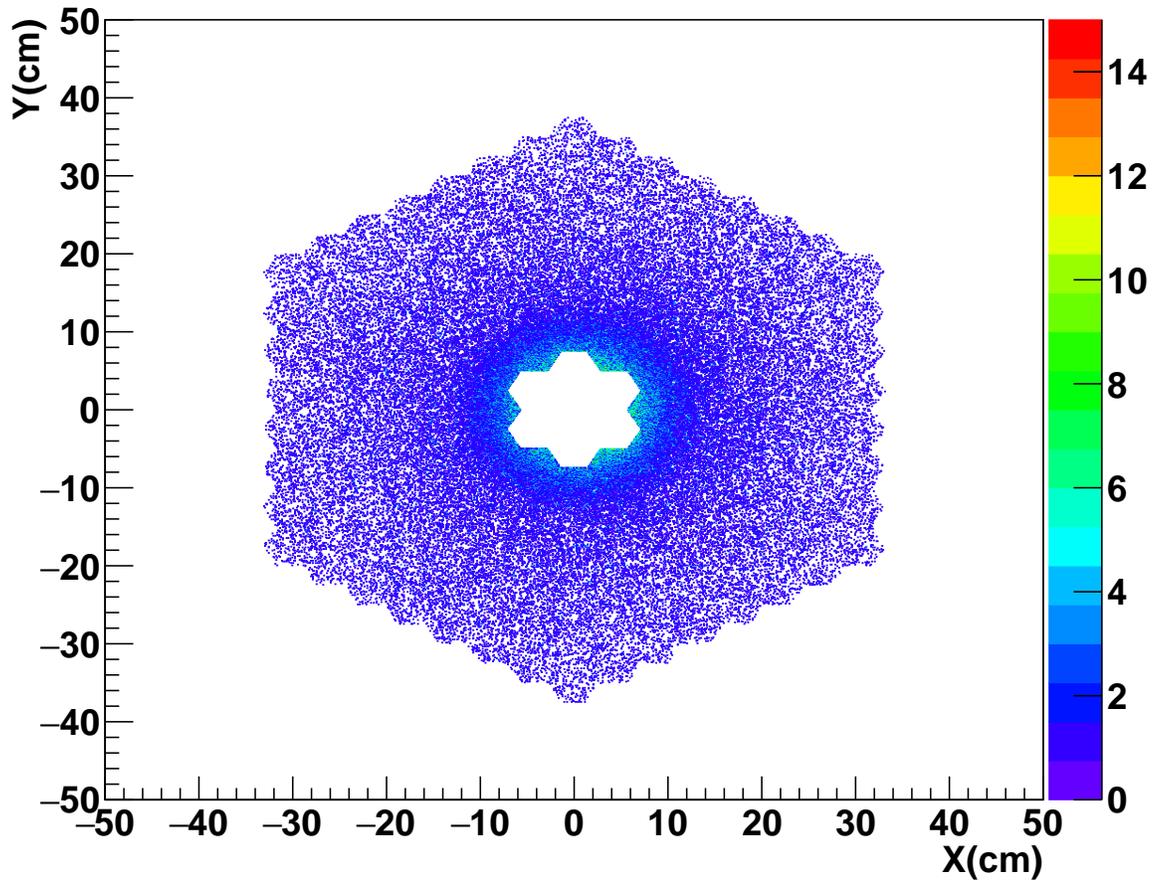


Fig. 10: Distribución espacial de partículas cargadas capturadas en el detector BeBe. Cada punto indica la posición de las partículas en el plano X - Y , donde el color indica el número de partículas en dicha ubicación. Se distingue que la intensidad es más alta en los anillos internos en comparación con el resto. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.

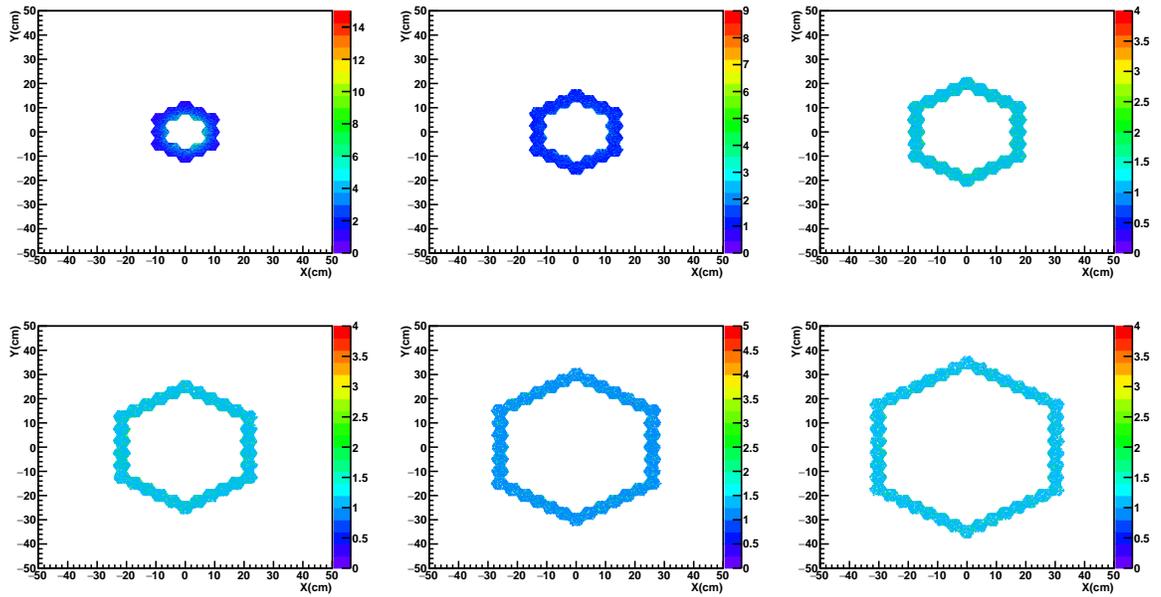


Fig. 11: Distribución de partículas cargadas capturadas cada uno de los anillos de BeBe. Vista en el plano X - Y . En este trabajo, se indica como anillo 1 al más interno y como anillo 6 al más externo. Cada punto indica la posición de las partículas en el plano X - Y , donde el color indica el número de partículas en dicha ubicación. Se distingue que la intensidad es más alta en los anillos internos en comparación con el resto. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.

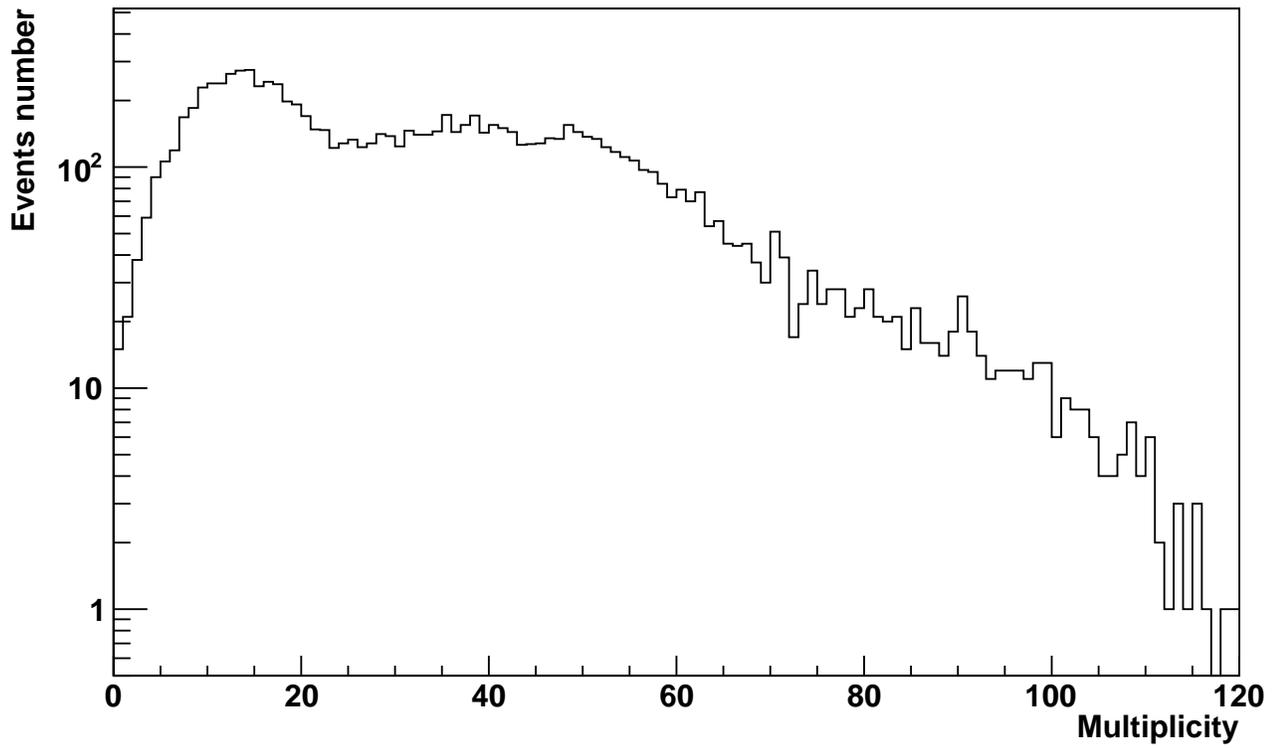


Fig. 12: Distribución de multiplicidad de las partículas cargadas capturadas en todos los anillos de BeBe. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.

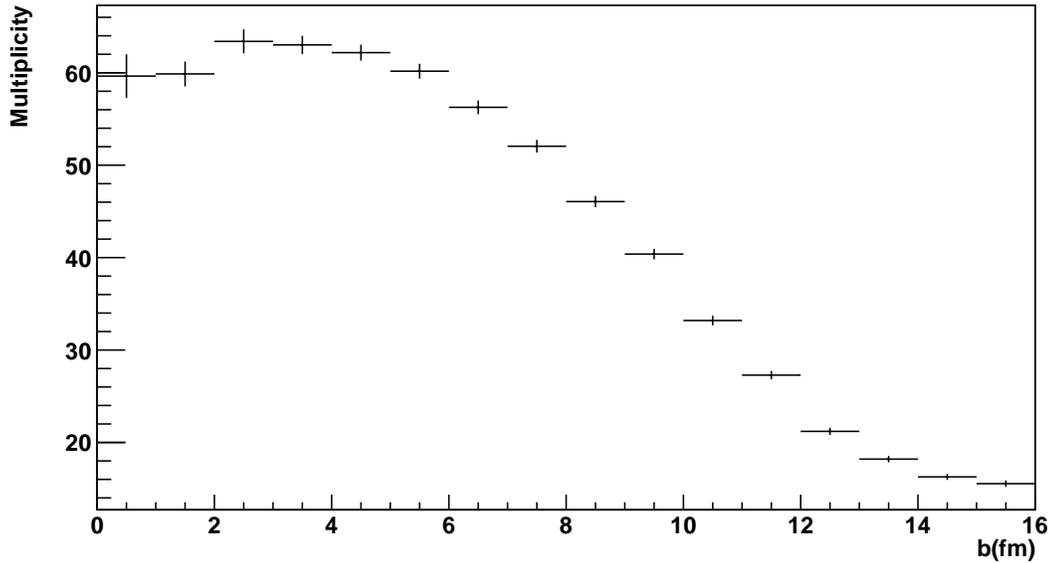


Fig. 13: Multiplicidad promedio de partículas cargadas capturadas por todos los anillos de Be-Be vs el parámetro de impacto. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.

comportamiento de la distribución para multiplicidades entre 0 y 20 difiere del típico discutido anteriormente, lo cual es un indicativo de que no se obtendrá una buena correlación entre la multiplicidad y el parámetro de impacto. En la figura (13) se ve la relación entre estas cantidades. De 0 a 5 fm y de 14 a 16 fm, la multiplicidad promedio permanece aproximadamente constante, es decir, no hay una correlación para los eventos más centrales ni para los más periféricos. Para estudiar este comportamiento a más a detalle, se analizará esta correlación para cada uno de los anillos de BeBe.

En la figura (14) se nota que en el primer anillo la multiplicidad aumenta conforme aumenta el parámetro de impacto, es decir, es el comportamiento contrario al deseado, pues se espera que la multiplicidad disminuya conforme aumenta el parámetro de impacto. Ésto se debe a que el anillo interior captura más protones espectadores por estar más cerca del haz. La multiplicidad de los espectadores incrementa al incrementar el parámetro de impacto, pues el traslape de la colisión disminuye, resul-

tando en la disminución del número de participantes y en el aumento del número de espectadores que continúan en dirección cercana al haz. La figura (15) es una representación gráfica de los protones producidos en un evento $Au + Au$, donde la mayoría son espectadores y cubren la región del primer anillo de BeBe. En el segundo anillo se distingue parcialmente el comportamiento esperado, pues hay irregularidades para colisiones centrales. Para los anillos 3, 4, 5 y 6 (14) se nota que la multiplicidad disminuye conforme el parámetro de impacto aumenta, tal y como se espera.

Así, el primer anillo no puede ser utilizado para determinar la centralidad mediante la multiplicidad de las partículas cargadas. A pesar de lo anterior, es tentativo que este anillo pueda usarse para determinar la centralidad a través de la energía depositada por los protones espectadores. Como se revisó en el primer capítulo, éstos hacen con otros detectores como el ZDC. Esta idea es motivada por el hecho de que la mayoría de los protones que son capturados por este anillo son espectadores, tal y como se ve en la figura (9). Para confirmar esta idea es necesario realizar un estudio más detallado sobre los protones espectadores y el anillo correspondiente, lo cual podría ser una continuación de este trabajo de tesis. Regresando al estudio de la centralidad mediante la multiplicidad, los análisis anteriores indican que se deben usar los anillos 3, 4, 5 y 6 para determinar la centralidad a través esta observable. En la figura (16) se tiene un comportamiento con tendencia lineal entre la multiplicidad y el parámetro de impacto, resultante de utilizar los anillos mejor comportados. Así, se procederá a determinar la centralidad empleando estos anillos.

En la figura (17) se encuentra la distribución de multiplicidad de las partículas cargadas capturadas por los anillos externos de BeBe. Esta distribución tiene un mejor comportamiento que la correspondiente a todos los anillos de BeBe de la figura (12). Sin embargo aún se presentan irregularidades debidas al bajo número de eventos, por lo cual en el siguiente capítulo se incrementará el número de eventos.

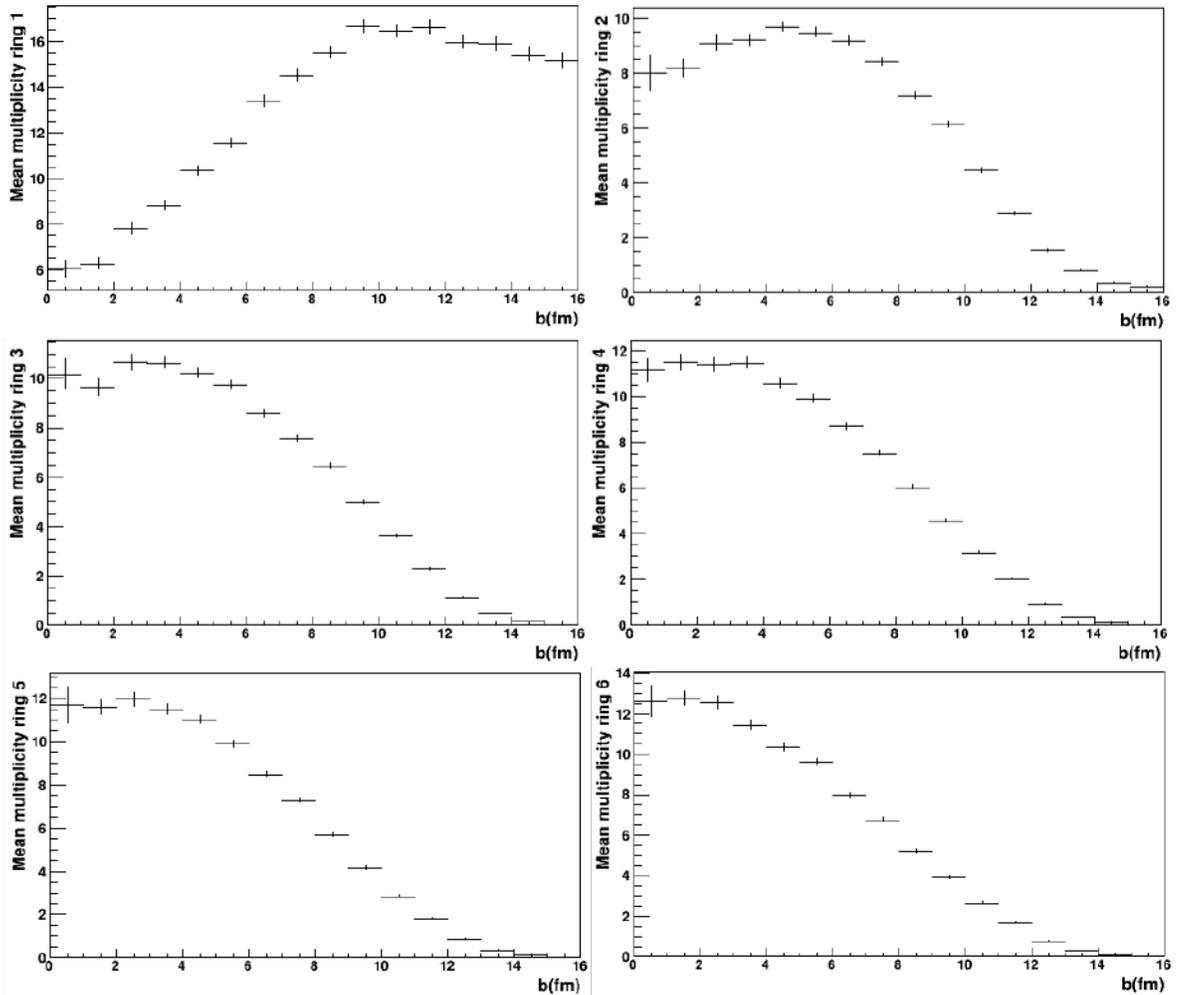


Fig. 14: Correlación de multiplicidad media de partículas cargadas capturadas en cada uno de los anillos de BeBe vs parámetro de impacto. En el primer anillo la multiplicidad incrementa conforme aumenta el parámetro de impacto. Lo anterior se debe a que dicho anillo captura más protones espectadores por estar más cerca del haz. La multiplicidad de los espectadores aumenta al incrementar el parámetro de impacto, pues el traslape de la colisión disminuye, resultando en la disminución del número de participantes y en el aumento del número de espectadores que continúan en dirección cercana al haz. En los anillos 3, 4, 5 y 6 la multiplicidad disminuye conforme aumenta el parámetro de impacto, por lo cual se sugiere emplear estos anillos para determinar la centralidad. Esta figura corresponde a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.



Fig. 15: Representación gráfica de 1 evento $Au + Au$ en el cual se visualizan los protones, siendo en su mayoría espectadores y se encuentran en la región del primer anillo de BeBe. Evento generado con UrQMD y posteriormente transportado por el detector BeBe simulado en MPDROOT.

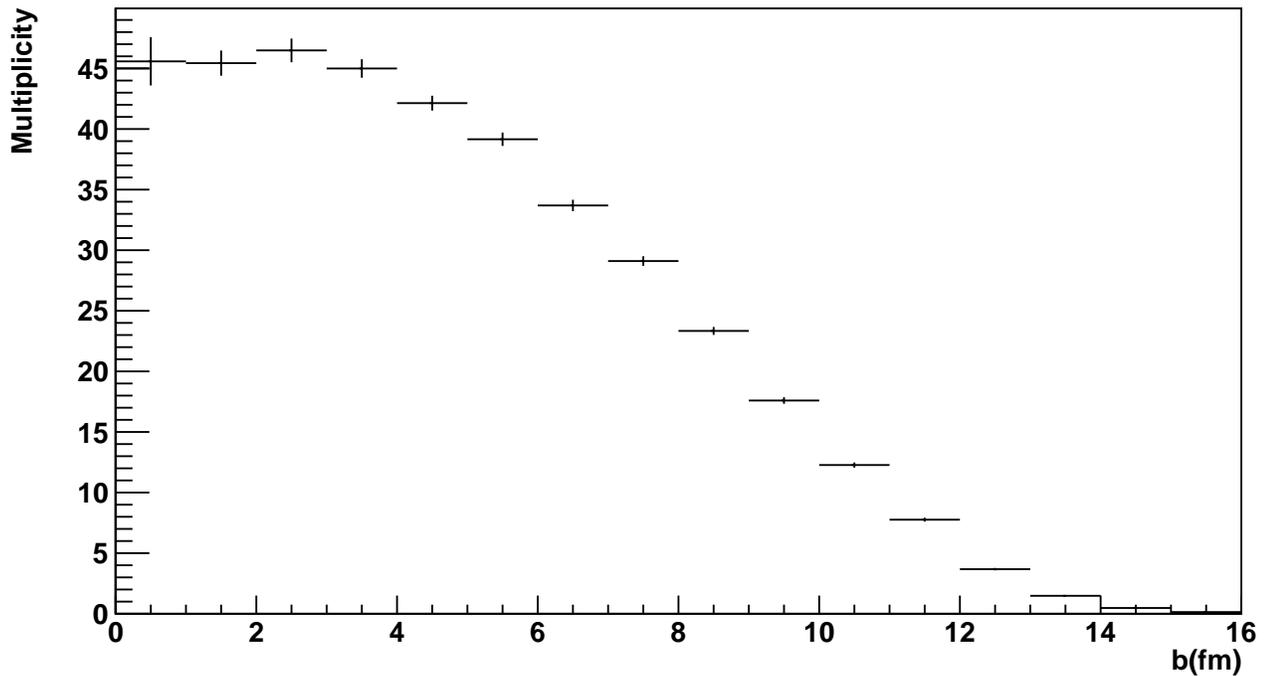


Fig. 16: Correlación de multiplicidad media vs parámetro de impacto. La multiplicidad disminuye conforme aumenta el parámetro de impacto. Considerando a la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.

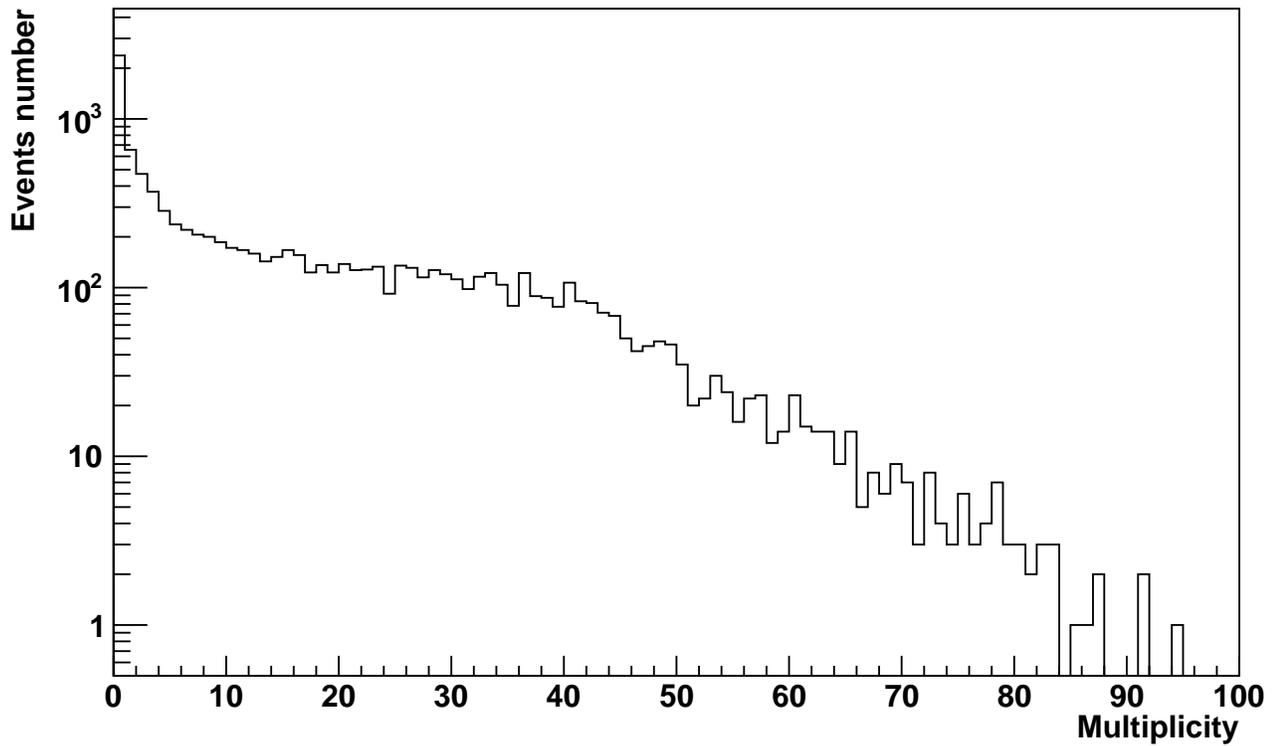


Fig. 17: Distribución de multiplicidad de las partículas cargadas capturadas por los anillos externos de BeBe. Esta distribución tiene un mejor comportamiento que la correspondiente a todos los anillos de BeBe. Sin embargo aún se presentan fluctuaciones debidas al bajo número de eventos. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones *Au + Au minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.

RESULTADOS: ESTUDIO DE CENTRALIDAD MEDIANTE LA MULTIPLICIDAD EN BEBE

La relación entre la multiplicidad y las propiedades de la colisión tales como la centralidad, se obtiene usualmente a partir de un modelo de la colisión, como UrQMD, o mediante los modelos Monte Carlo Glauber y de producción de partículas. El uso de los modelos Glauber y de producción de partículas es motivado por la observación de que la multiplicidad muestra una dependencia lineal respecto a la centralidad [31], tal y como se revisó anteriormente. En este capítulo, se aplicaron tanto las ideas del capítulo 2 como los resultados del capítulo 3 para determinar la centralidad mediante la multiplicidad de BeBe. Para ello se abordaron dos enfoques distintos. En el primero se utilizó el parámetro de impacto conocido de a priori en UrQMD. Por otra parte, en el segundo enfoque se emplearon la distribución binomial negativa y el modelo glauber para estimar la centralidad. Con el primer método se obtuvieron resultados conclusivos sobre las capacidades de BeBe para estimar la centralidad, mientras que con el segundo método se obtuvieron resultados preliminares. A continuación se revisará a detalle la aplicación de los dos métodos mencionados. Los resultados corresponden a 1,000,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{s_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.

En la primera parte se obtuvieron las distribuciones de N y b mediante UrQMD y MPDROOT, lo cual permitió definir las clases de centralidad en términos del parámetro de impacto. Para cada partícula cargada que es detectada por BeBe, de UrQMD se conoce el valor de b del evento en el cual fue generada dicha partícula. Así, se construyó un histograma con el número de partículas por bins de parámetro de impacto. De modo que la integral a lo largo de todos los valores del parámetro de impacto del histograma es igual a la multiplicidad total. Como se vio en el capítulo 2, cada clase indica los valores de b en los cuales se tiene un cierto porcentaje o fracción de la multiplicidad total. Para estimar los valores de b para cada clase, se desarrolló un algoritmo de integración en intervalos de parámetro de impacto, de modo que se busca el valor de b hasta que la integral en dicho intervalo corresponde a la clase de centralidad a estimar. Posteriormente se empleó el modelo Glauber para simular ensembles de 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ para cada clase de centralidad. De modo que se obtuvieron los valores medios de N_{par} y N_{col} para cada clase. Después, se estimaron las clases de multiplicidad, las cuales están relacionadas con las clases de centralidad obtenidas en términos del parámetro de impacto.

Por otra parte, se abordó el enfoque mediante el ajuste de la distribución binomial negativa en conjunto con el modelo Glauber a la distribución de multiplicidad medida en el detector. Para ello se construyó un histograma de multiplicidad, donde se tiene el número de eventos por bins de multiplicidad de BeBe. Enseguida se realizó un ajuste a dicha distribución mediante la distribución binomial negativa, tomando de entrada valores de N_{par} y N_{col} de un ensemble simulado de 100,000 eventos *minimum bias* de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$. La implementación de este método aún se encuentra en proceso. La continuación de este enfoque puede proceder usando como guía las referencias [11], [23] y [32], así como el código adaptado recientemente por la colaboración MPD-NICA [33].

Recordando la relación entre la centralidad y la multiplicidad, la multiplicidad incrementa conforme disminuye el parámetro de impacto, es decir, eventos de colisiones

centrales producen altas multiplicidades y eventos de colisiones periféricas producen bajas multiplicidades. De acuerdo al capítulo anterior, se deben emplear los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe para los estudios de centralidad. Así, como se revisó en el capítulo 2, la distribución de multiplicidad de las partículas cargadas en los anillos 3, 4, 5 y 6 de la figura (18) tiene la forma esperada. Hay un pico correspondiente a las colisiones más periféricas en la región de multiplicidades entre 0 y 10. Entre multiplicidades de 10 y 45 permanece aproximadamente constante y decae conforme las colisiones son más centrales, para multiplicidades de 45 en adelante [13].

Con el propósito de tener una comparación, se realizaron de forma paralela los análisis anteriores considerando una simulación sin detector. La distribución de multiplicidad de la figura (19) corresponde en este caso a la región de pseudorapidez de los anillos externos de BeBe y presenta un comportamiento similar al incluir la simulación del detector; también tiene un pico correspondiente a las colisiones más periféricas de 0 a 10, permanece constante en un rango más amplio de multiplicidades (de 10 a 120) y finalmente decae abruptamente en la región de multiplicidades más altas (de 120 en adelante), correspondiente a las colisiones centrales. La diferencia entre distribuciones anteriores reside en que no todas las partículas que llegan a BeBe son detectadas. En la simulación con el detector hay una serie de condiciones para determinar si una partícula dejó una señal o no. Existen distintos criterios de selección de partículas (ver anexo para más detalles). En este caso, las partículas detectadas son aquellas lo suficientemente energéticas, de modo que atraviesan por completo el plástico centellador de BeBe. Así se asegura que dicha partícula tiene una alta probabilidad de ser detectada. Sin embargo, también se pierden partículas que pueden ser detectadas. El número de partículas detectadas es aproximadamente el 40.21 % de la simulación sin detector en la región de los anillos externos de BeBe. La comparación entre los resultados de las simulaciones con detector y sin detector dan una idea de la efectividad de BeBe para realizar los estudios de centralidad y del criterio para seleccionar a las partículas detectadas.

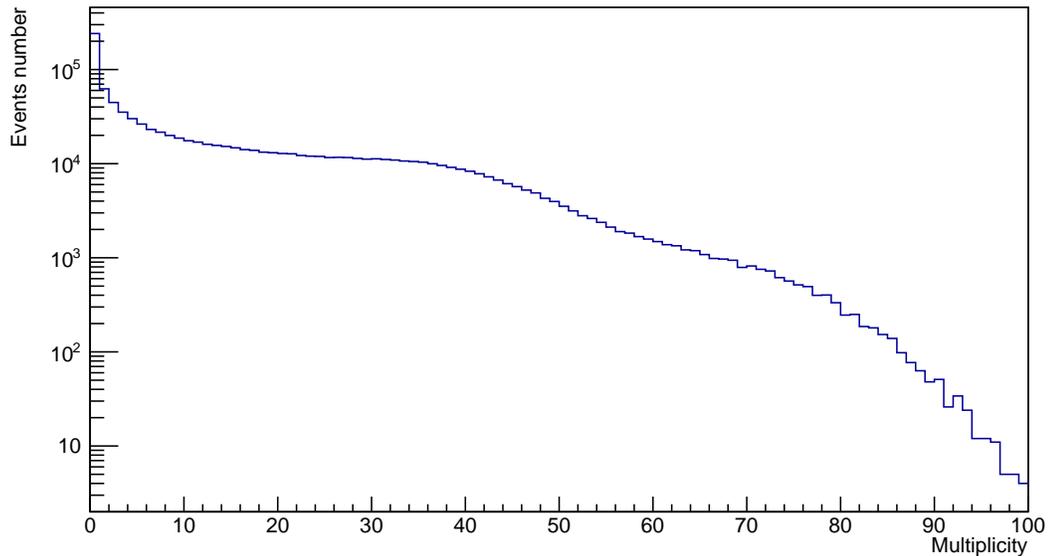


Fig. 18: Distribución de multiplicidad de las partículas cargadas capturadas por los anillos externos de BeBe. Esta distribución tiene la forma esperada, hay un pico correspondiente a las colisiones más periféricas en la región de multiplicidades de 0 a 5. Entre multiplicidades de 10 y 45 permanece aproximadamente constante y decae conforme las colisiones son más centrales, de multiplicidad de 45 en adelante. Una vez obtenida esta distribución, es posible determinar las clases de centralidad y hacer un ajuste con la distribución binomial negativa y el modelo Glauber.

4.1 CLASES DE CENTRALIDAD

Usando las ideas del capítulo 2, se determinaron las clases de centralidad en términos del parámetro de impacto y la multiplicidad. En el siguiente enfoque se se realizó la conexión entre la multiplicidad y la centralidad mediante la multiplicidad simulada de BeBe y el parámetro de impacto conocido de *a priori* por UrQMD. El objetivo es conocer en qué rangos del parámetro de impacto se encuentran los respectivos porcentajes de multiplicidad total. Para ello, primero se construyen los histogramas de la figura (20). En la figura superior se tiene la distribución del parámetro por cada uno de los eventos simulados, donde los valores b están dados en la simulación.

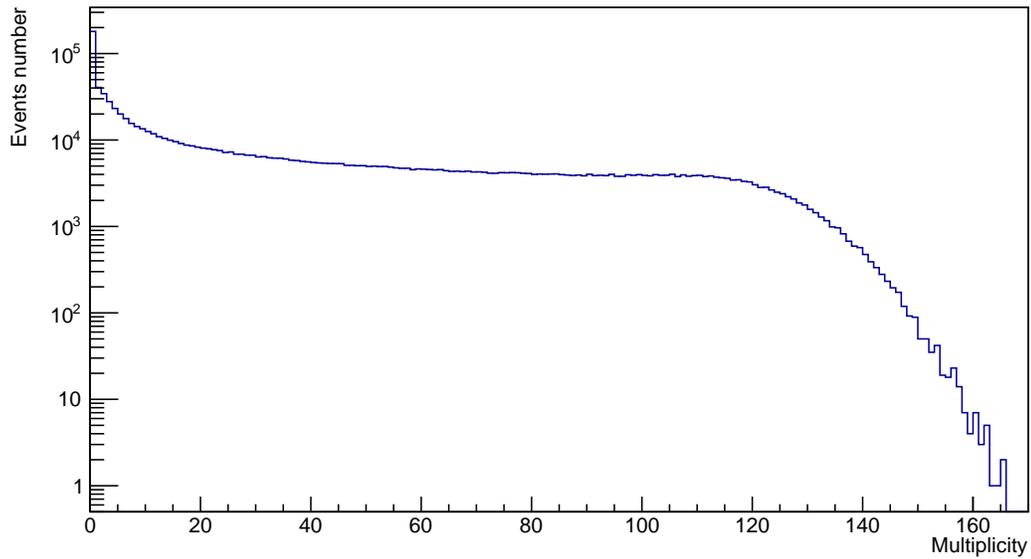


Fig. 19: Distribución de multiplicidad de las partículas cargadas en la región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. Simulación sin detector. Esta distribución tiene la forma esperada, hay un pico correspondiente a las colisiones más periféricas para multiplicidades de 0 a 10. Entre multiplicidades de 10 y 120 permanece aproximadamente constante y decae abruptamente en la región de multiplicidades más altas, correspondiente a los eventos de las colisiones más centrales.

Es decir, este histograma dice cuántos eventos hay por cada bin del parámetro de impacto.

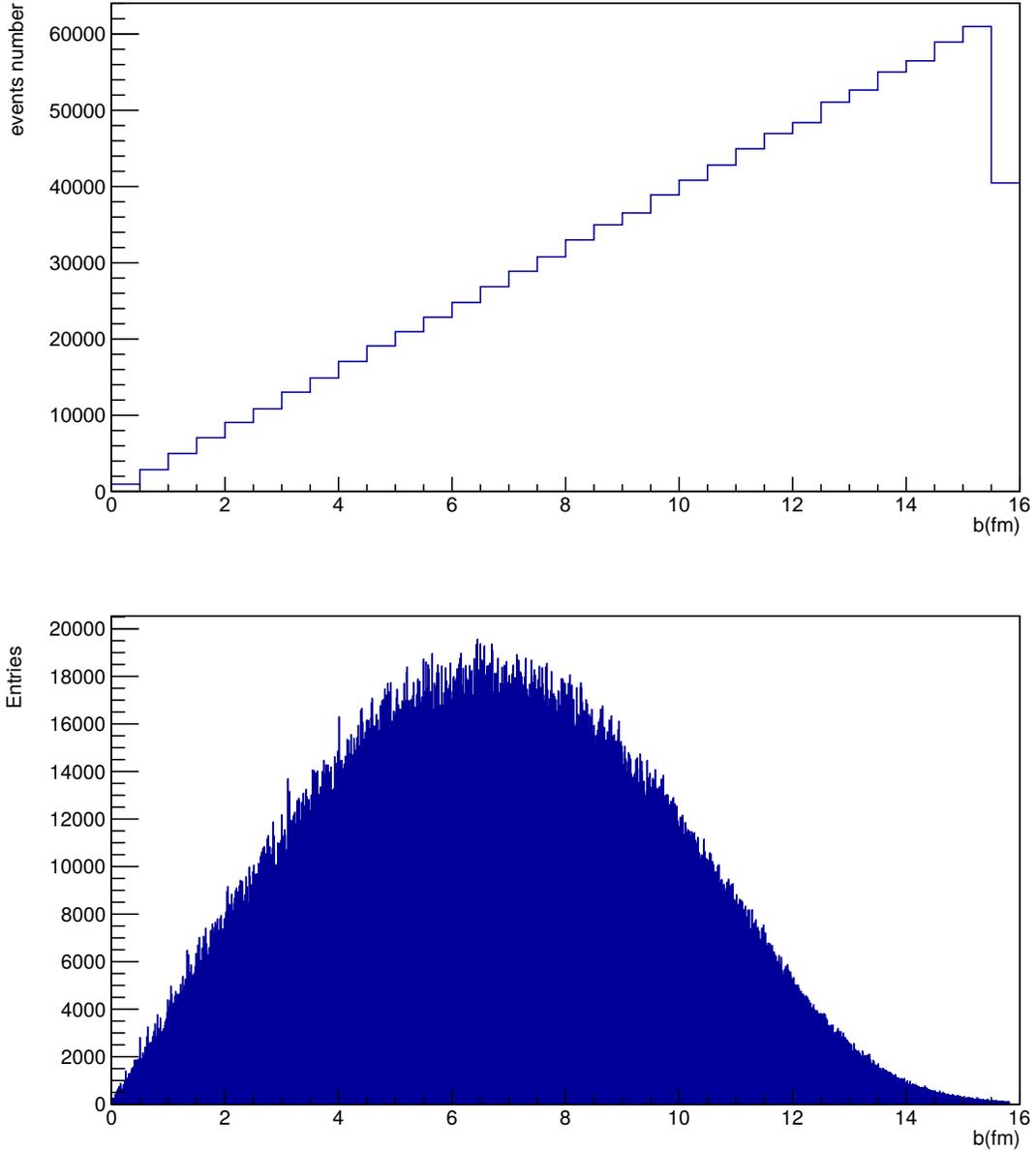


Fig. 20: Distribuciones del parámetro de impacto de 1, 000, 000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT. Número de eventos por bins de parámetro de impacto (figura superior) y número de partículas por bins de parámetro de impacto (figura inferior). Al nivel de la simulación se conoce el parámetro de impacto del evento en el cual fue producida cada una de las partículas detectadas por BeBe. De este modo, se construye un histograma donde el número de entradas por bins de b representa el número de partículas que se generaron en los eventos con dicho parámetro de impacto. Así, la integral total del histograma corresponde a la multiplicidad de todos los eventos de las colisiones. Puesto que cada clase de centralidad representa una fracción de la multiplicidad total, es posible conocer el número de partículas para cada clase de centralidad. Para cada clase se integra en intervalos de b hasta que la integral corresponde a la fracción de la multiplicidad de dicha clase. De este modo, se estimaron los valores de b para cada clase de centralidad.

Como el objetivo es relacionar la multiplicidad con el parámetro de impacto, es posible contar el número de partículas en cada uno de estos eventos. Con este fin se construye el histograma de la figura inferior, el cual tiene el número de partículas por bins de parámetro de impacto. Enseguida se estiman los valores del parámetro de impacto correspondientes a cada una de las clases de centralidad. Para lograrlo, se integra el histograma inferior en intervalos pequeños del parámetro de impacto hasta que los valores de la integral correspondan a cada una de las clases de centralidad de acuerdo a la ecuación (5). Así, se obtienen las clases de centralidad. En la figura (21) se muestran las clases de centralidad en los distintos rangos del parámetro de impacto. Este estudio fue realizado mediante la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe, como se concluyó en el capítulo 3. Enseguida, se obtienen los valores de N_{par} y N_{col} de la simulación mediante el modelo Monte Carlo Glauber y se calculan los promedios para cada una de las clases. En la tabla (2) se tienen tanto los valores del parámetro de impacto para las clases del caso mencionado anteriormente, como los valores de $\langle N_{par} \rangle$ y $\langle N_{col} \rangle$ calculados.

$$c = \frac{\int_0^b \frac{dN_{ch}}{db'} db'}{\int_0^{b_{max}} \frac{dN_{ch}}{db'} db'} = \frac{1}{N_{tot}} \int_0^b \frac{dN_{ch}}{db'} db'. \quad (5)$$

En las tablas (3) y (4) se encuentran los valores correspondientes a las clases de centralidad de la simulación sin detector. La primera es para la región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe y la segunda es en todo el espacio fase de pseudorapidez. Comparando los resultados de la simulación con BeBe y la simulación sin detector en la región de los anillos externos, resulta que los valores de las clases son similares. En la figura (22) se tienen las clases de centralidad para el caso de simulación sin detector, se nota que los valores de las clases son similares que al considerar al detector. En la tabla (5) se ve que difieren entre 0.2% y 2%, lo cual no solamente se debe a la eficiencia de BeBe, sino que al definir la región de pseudorapidez en los aná-

lisis sin detector, ésta no describe exactamente la región espacial de BeBe, sino que es una aproximación circular a los anillos hexagonales, de modo que se pierden partículas en algunas regiones, pero se ganan otras. Entonces, para este análisis en particular no resulta crucial la selectividad de las partículas detectadas, pero más estudios son necesarios para corroborar la importancia en otros análisis. Si se compara el caso en el que se usa la multiplicidad de todo el espacio fase con el caso en el que se emplean los anillos 3, 4, 5, y 6, se pierden los eventos más periféricos en el segundo caso, que es precisamente lo que se busca lograr, pues en este tipo de eventos es en donde hay más protones participantes cuya multiplicidad muestra un comportamiento inverso al deseado en el enfoque empleado.

La determinación de la centralidad mediante la multiplicidad de BeBe y la distribución del parámetro de impacto de UrQMD se resume en los siguientes pasos:

- Se construye el histograma del número de partículas por bins de parámetro de impacto.
- Se integra el histograma anterior en regiones de parámetro de impacto hasta encontrar los valores para una determinada clase de centralidad.
- Se repite el paso anterior para cada clase de centralidad.
- Se obtiene N_{par} y N_{col} mediante la simulación de los eventos con el modelo Glauber para cada clase de centralidad.

En el tercer punto, queda determinada la centralidad en términos del parámetro de impacto y la multiplicidad, sin embargo, es posible obtener más información sobre la centralidad en términos de N_{par} y N_{col} , obtenidos con el modelo Glauber.

En los análisis previos se realizó la conexión entre la observable y la centralidad mediante la multiplicidad simulada de BeBe y el parámetro de impacto conocido de a priori por UrQMD. No obstante, en el experimento no se conoce directamente el pa-

Clases de centralidad

Clase	b inferior (fm)	b superior (fm)	$\langle N_{par} \rangle$	$\langle N_{col} \rangle$
0-10	0	2.7895	350.6	829.7
10-20	2.7895	4.0005	307.4	694.1
20-30	4.0005	4.9805	267.5	576.7
30-40	4.9805	5.8605	231.3	474.8
40-50	5.8605	6.9995	196.5	382
50-60	6.9995	7.5505	162.2	295.6
60-70	7.5505	8.4495	128.8	217.0
70-80	8.4495	9.4505	95.42	145.2
80-90	9.4505	10.7505	60.27	78.86
90-100	10.7505	14.9605	15.97	15.52

Tab. 2: Clases de centralidad, considerando la multiplicidad de los anillos externos (3, 4, 5, y 6) de BeBe. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Se empleó la definición de clases de centralidad en términos de la multiplicidad para estimar los valores de b para cada clase. Los valores medios de N_{par} y N_{col} se obtuvieron al simular con el modelo Glauber un ensemble de eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ con rango de parámetro de impacto correspondiente a cada clase de centralidad.

Clases de centralidad

Clase	b inferior (fm)	b superior (fm)	$\langle N_{par} \rangle$	$\langle N_{col} \rangle$
0-10	0	2.7305	351.2	832.4
10-20	2.7305	3.9305	309.7	700.8
20-30	3.9305	4.8895	271	586.3
30-40	4.8895	5.7695	234.8	485.1
40-50	5.7695	6.6195	199.3	390.6
50-60	6.6195	7.4695	165.5	304.1
60-70	7.4695	8.3595	132.3	224.9
70-80	8.3595	9.3805	97.83	150.2
80-90	9.3805	10.6895	62.15	82.03
90-100	10.6895	14.9305	16.34	16.04

Tab. 3: Clases de centralidad, considerando la multiplicidad correspondiente a la región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5, y 6. Simulación sin detector. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Los valores medios de N_{par} y N_{col} se obtuvieron al simular con el modelo Glauber un ensemble de eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ con rango de parámetro de impacto correspondiente a cada clase de centralidad.

Clases de centralidad

Clase	b inferior (fm)	b superior (fm)	$\langle N_{par} \rangle$	$\langle N_{col} \rangle$
0-10	0	2.8805	348.5	823.6
10-20	2.8805	4.2395	301.8	674.7
20-30	4.2395	5.4005	254.7	541
30-40	5.4005	6.5005	209.4	416.1
40-50	6.5005	7.6195	164.7	302.9
50-60	7.6195	8.8195	120.5	198.8
60-70	8.8195	10.1895	77.51	110.4
70-80	10.1895	11.8505	37.86	43.1
80-90	11.8505	13.8295	11.51	9.81
90-100	13.8295	15.8005	3.668	2.422

Tab. 4: Clases de centralidad, considerando la multiplicidad de todo el espacio fase. Simulación sin detector. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Los valores medios de N_{par} y N_{col} se obtuvieron al simular con el modelo Glauber un ensemble de eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 GeV$ con rango de parámetro de impacto correspondiente a cada clase de centralidad.

Comparación de clases de centralidad: simulación con detector y sin detector

Clase	b inferior (fm)	b superior (fm)	b inferior (fm)	b superior (fm)	diferencia (%)
0-10	0	2.7895	0	2.7305	2.1607
10-20	2.7895	4.0005	2.7305	3.9305	1.7809
20-30	4.0005	4.9805	3.9305	4.8895	1.8611
30-40	6.4405	5.8605	4.8895	5.7695	1.5772
40-50	5.8605	6.9995	5.7695	6.6195	1.2085
50-60	6.9995	7.5505	6.6195	7.4695	1.0844
60-70	7.5505	8.4495	7.4695	8.3595	1.0766
70-80	8.4495	9.4505	8.3595	9.3805	0.8528
80-90	9.4505	10.7505	9.3805	10.6895	0.5706
90-100	10.7505	14.9605	10.6895	14.9305	0.2006

Tab. 5: Clases de centralidad. Comparación de simulación con detector (izquierda) y sin detector (derecha). Ambos casos corresponden a una simulación de 1,000,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11 GeV$ generados en UrQMD. Para el caso en el cual se consideró la simulación del detector se empleó MPDROOT para simular a BeBe. La diferencia es entre 0,2 % y 2 %, lo cual indica que para este análisis en particular no resulta crucial la selectividad de las partículas detectadas.

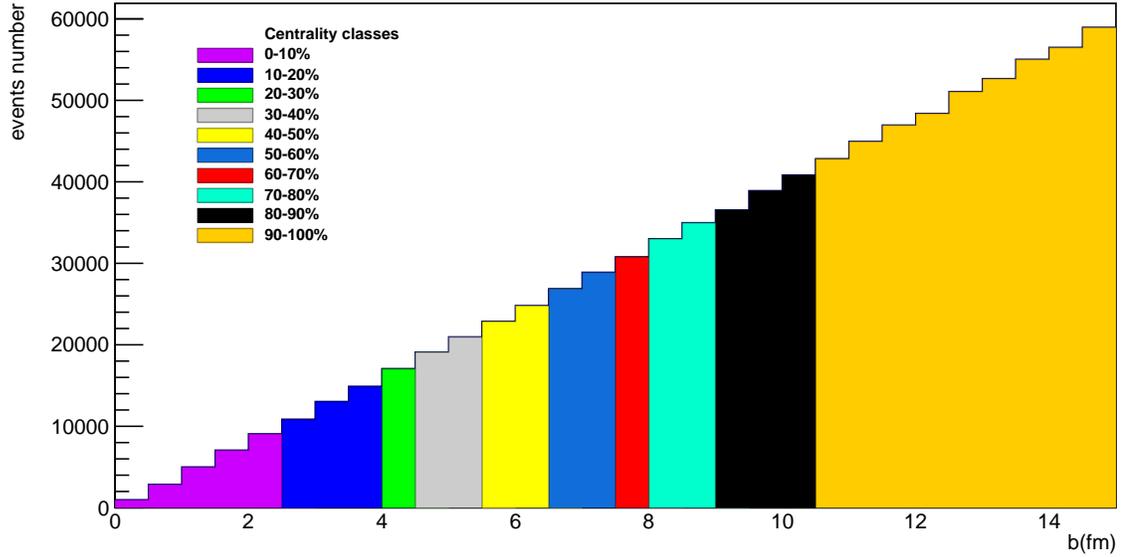


Fig. 21: Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Se empleó la definición de clases de centralidad en términos de la multiplicidad para estimar los valores de b para cada clase.

rámetro de impacto ni ninguna otra propiedad geométrica de las colisiones, por lo cual ahora se parte de la multiplicidad del detector, la cual ya se corroboró que está relacionada con el parámetro de impacto. Empleando el mismo método para determinar las clases de centralidad se procede a determinar las clases de multiplicidad. De forma análoga a la distribución del número de partículas totales por bins de parámetro de impacto de la figura (20), se construye un histograma uni-dimensional con el número total de partículas por bins de multiplicidad de BeBe (23), el cual se integra de acuerdo a la ecuación (1) para determinar dichas clases. En las figuras (24) y (25) se tienen las clases mediante la simulación de BeBe y la simulación sin detector respectivamente. Las clases de multiplicidad están directamente relacionadas con las clases de centralidad obtenidas anteriormente, de modo que la clase de multiplicidad de 10% tiene asociados los valores del parámetro de impacto determinados para la clase de centralidad de 10%, así como los valores de N_{par} y N_{col} calculados con el modelo Monte Carlo Glauber para dicha centralidad. En la tablas (6) y (7) se mues-

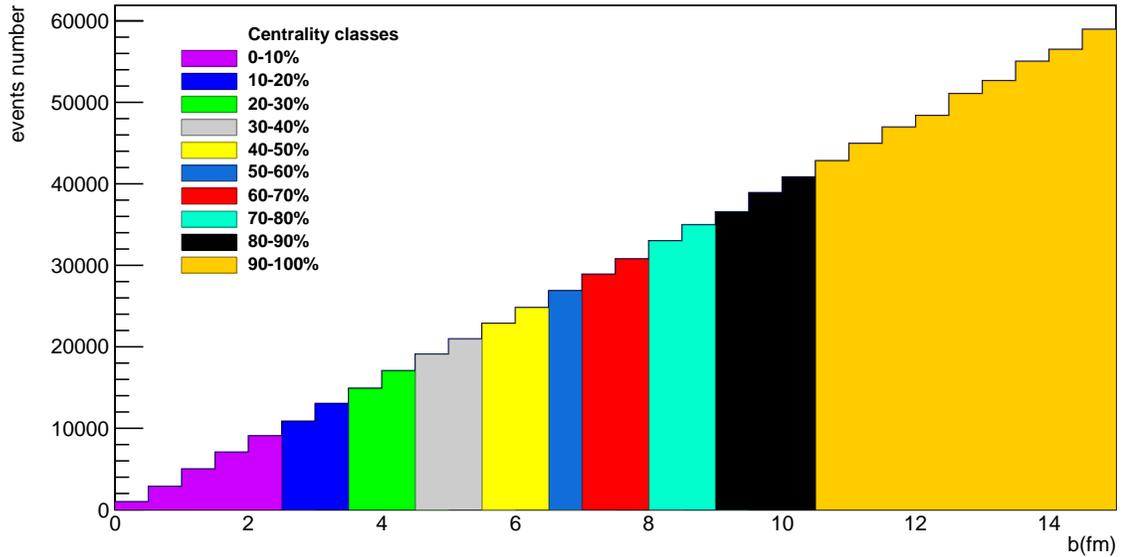


Fig. 22: Clases de centralidad usando la multiplicidad en la región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. Simulación sin detector. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Se empleó la definición de clases de centralidad en términos de la multiplicidad para estimar los valores de b para cada clase.

trán los valores del parámetro de impacto y de la multiplicidad para cada una de las clases, considerando la simulación con y sin detector respectivamente.

4.2 DISTRIBUCIÓN BINOMIAL NEGATIVA

La multiplicidad producida en colisiones de iones pesados relativistas puede ser descrita por la NBD acoplada al modelo Glauber. Así, para generar el número de partículas producidas por interacción, se usa la distribución NBD de la ecuación (2), que da la probabilidad de medir n partículas por antecesor. Además, se asume que el número de antecesores puede ser parametrizado por la ecuación (3).

Así, para obtener la multiplicidad promedio simulada por evento, se suma la multiplicidad producida por cada antecesor. En otras palabras, la distribución binomial

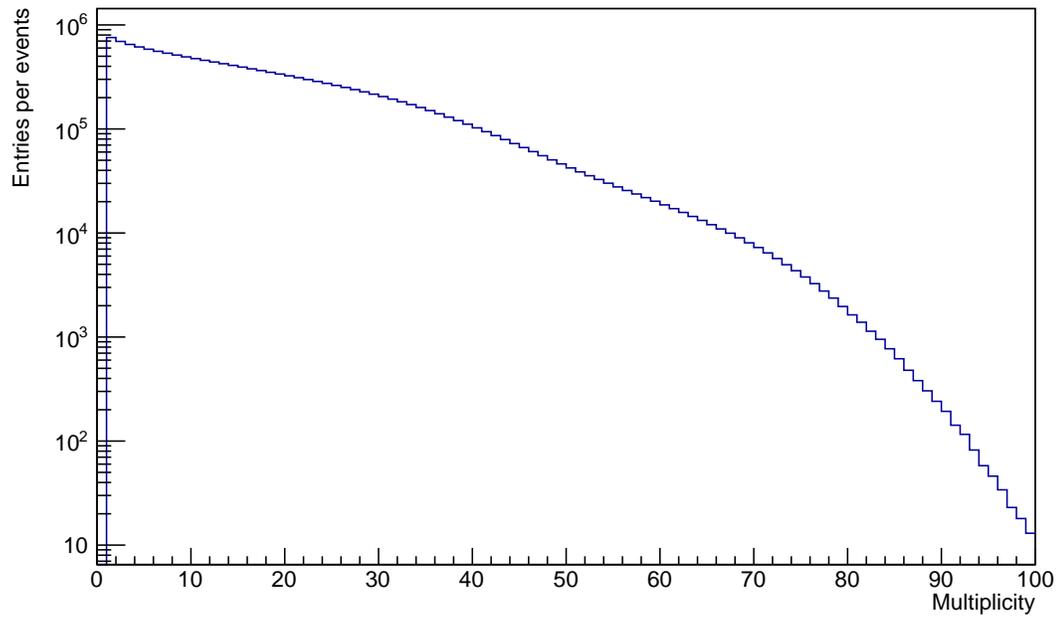
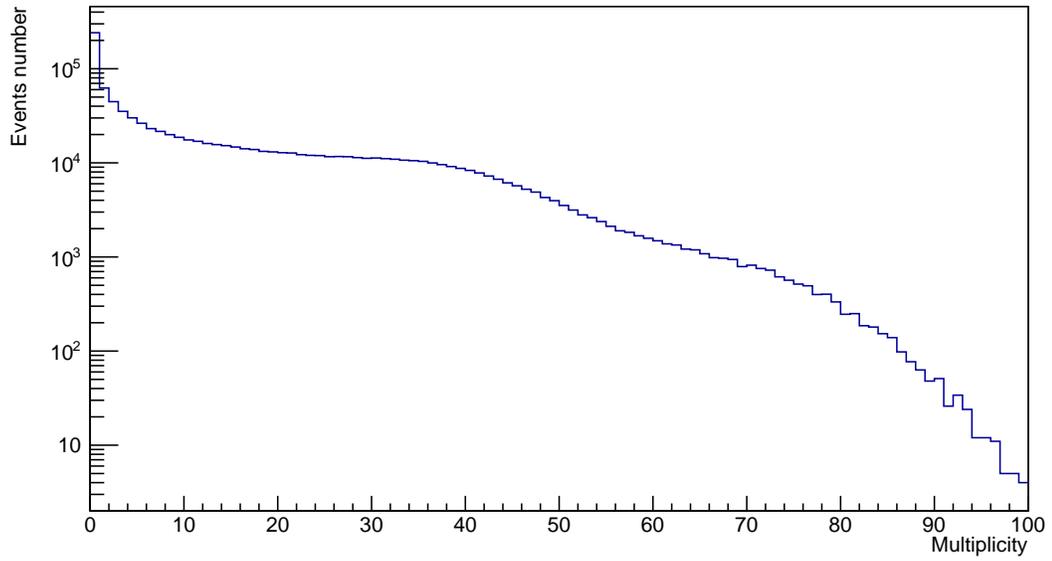


Fig. 23: Distribuciones de multiplicidad. Número de eventos por bins de multiplicidad (figura superior) y número de partículas por bins de multiplicidad (figura inferior).

Clases de centralidad

Class %	b min (fm)	b max (fm)	N_{chmax}	N_{chmin}
0-10	0	2.7895	100	37
10-20	2.7895	4.0005	37	29
20-30	4.0005	4.9805	29	23
30-40	4.9805	5.8605	23	18
40-50	5.8605	6.9995	18	14
50-60	6.9995	7.5505	14	11
60-70	7.5505	8.4495	11	8
70-80	8.4495	9.4505	8	5
80-90	9.4505	10.7505	5	3
90-100	10.7505	14.9605	3	0

Tab. 6: Clases de centralidad y multiplicidad, considerando la multiplicidad de los anillos externos (3, 4, 5, y 6) de BeBe. Cada clase de centralidad tiene asociado un rango de valores del parámetro de impacto y de la multiplicidad.

Clases de centralidad

Class %	b min (fm)	b max (fm)	N_{chmax}	N_{chmin}
0-10	0	2.7305	170	81
10-20	2.7305	3.9305	81	68
20-30	3.9305	4.8895	68	55
30-40	4.8895	5.7695	55	44
40-50	5.7695	6.6195	44	34
50-60	6.6195	7.4695	34	26
60-70	7.4695	8.3595	26	19
70-80	8.3595	9.3805	19	12
80-90	9.3805	10.6895	12	5
90-100	10.6895	14.9305	5	0

Tab. 7: Clases de centralidad y multiplicidad, considerando la multiplicidad correspondiente a la región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5, y 6. Simulación sin detector. Cada clase de centralidad tiene asociado un rango de valores del parámetro de impacto y de la multiplicidad.

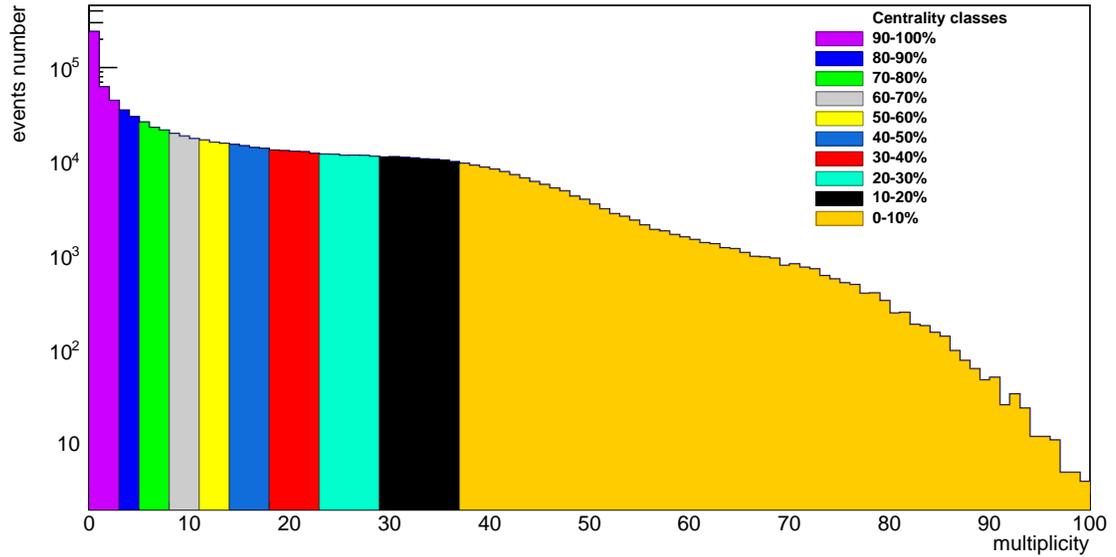


Fig. 24: Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe.

negativa muestrea una cantidad de veces igual al número de antecesores de acuerdo a la siguiente ecuación (4). Para estudiar la centralidad mediante la multiplicidad se aplica el siguiente procedimiento:

- Se construye el histograma de la multiplicidad de partículas cargadas N_{ch} en Be-Be, es decir, la distribución de la figura (18). Los valores de multiplicidad están asociados a un cierto número de antecesores, cuya probabilidad es descrita por la NBD.
- Se simula un ensemble de eventos mediante el modelo Glauber para obtener los valores medios de N_{par} y N_{col} , como se muestra en la figura (26). En este caso $N_{par} = 97.18$ y $N_{col} = 183.4$.
- Se ajusta la distribución binomial negativa acoplada con el modelo Glauber a la distribución de multiplicidad de acuerdo a las ecuaciones (3) y (2).

Al aplicar dicho algoritmo se obtiene la multiplicidad media por antecesor μ , así como los valores de los parámetros f y k . Con este algoritmo se realizaron los ajustes a las

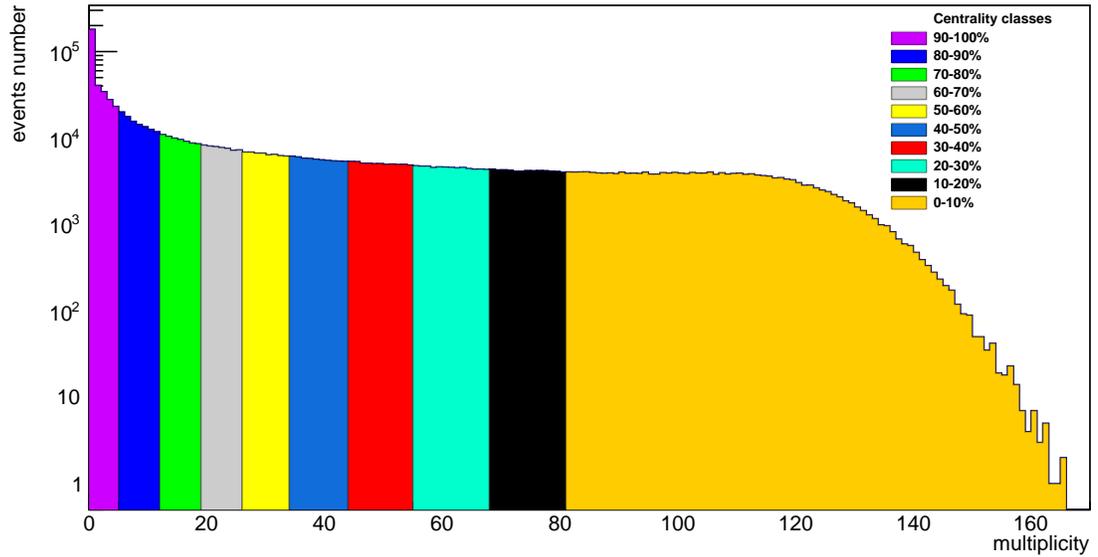


Fig. 25: Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos de la región de pseudo-rapidez de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. Simulación sin detector.

distribuciones de multiplicidad de las figuras (27), (28), (29) y (30). El procedimiento anterior es una aproximación al algoritmo descrito en el capítulo 2. Para un mejor ajuste es necesario considerar los valores de N_{par} y N_{col} para cada uno de los eventos del ensemble simulado con el modelo Glauber. Además de explorar el ajuste con distintos valores de los parámetros f y k .

Con este ajuste se determinan los valores de los parámetros, siendo en este caso $\mu = 14$, $k = 0.56$ y $f = 2.11$. En la región de altas multiplicidades, correspondiente a los eventos más centrales, la cantidad de eventos decae notablemente para multiplicidades superiores a 45. De este modo, al hacer un corte para eventos de multiplicidades superiores a 45, se obtiene una distribución más parecida a la esperada. En la figura (28) se tiene un ajuste a la distribución de multiplicidad considerando solamente a eventos de multiplicidades inferiores a 45. Dicho ajuste describe mejor la distribución de multiplicidad. Los valores de los parámetros ahora son $\mu = 13$, $k = 0.39$ y $f = 2.11$.

En las figuras (29) y (30) se muestra el ajuste para las distribuciones de multiplicidad simuladas sin detector. Al considerar el corte en las multiplicidades mayores a 120 el ajuste reproduce mejor dicha región de multiplicidad.

En las distribuciones de multiplicidad estudiadas, los respectivos ajustes describen bien las regiones de bajas multiplicidades, correspondientes a las colisiones periféricas. Sin embargo, la curva no se ajusta adecuadamente para las regiones de altas multiplicidades. Para mejorar estos ajustes es necesario realizar un estudio detallado de los parámetros k y f . No obstante, los ajustes a regiones de multiplicidad inferiores a 45 y a 120 para la simulación con detector y sin detector, respectivamente, describen dichas distribuciones adecuadamente, por lo cual sugieren reproducir los mismos análisis con distintos cortes de multiplicidad a lo largo de toda la distribución obtenida. Otro enfoque a explorar sería limitarse a la región que abarca el corte hasta multiplicidades de 45 y hacer un escalamiento, pues la forma de las distribuciones resultan similares al considerar los cortes. Además, lo usual es que el parámetro f esté limitado entre 0 y 1, para considerar que la producción de partículas depende tanto de N_{par} como de N_{col} , por lo que un siguiente paso sería tomarlo en consideración. Un detalle más a tomar en cuenta son los valores medios de N_{par} y N_{col} empleados en el ajuste. Mientras que se usaron los valores medios de N_{par} y N_{col} calculados para un ensemble de eventos *minimum bias*, resultaría más efectivo emplear los valores calculados para cada clase de centralidad que se encuentran en las tablas (2) y (3).

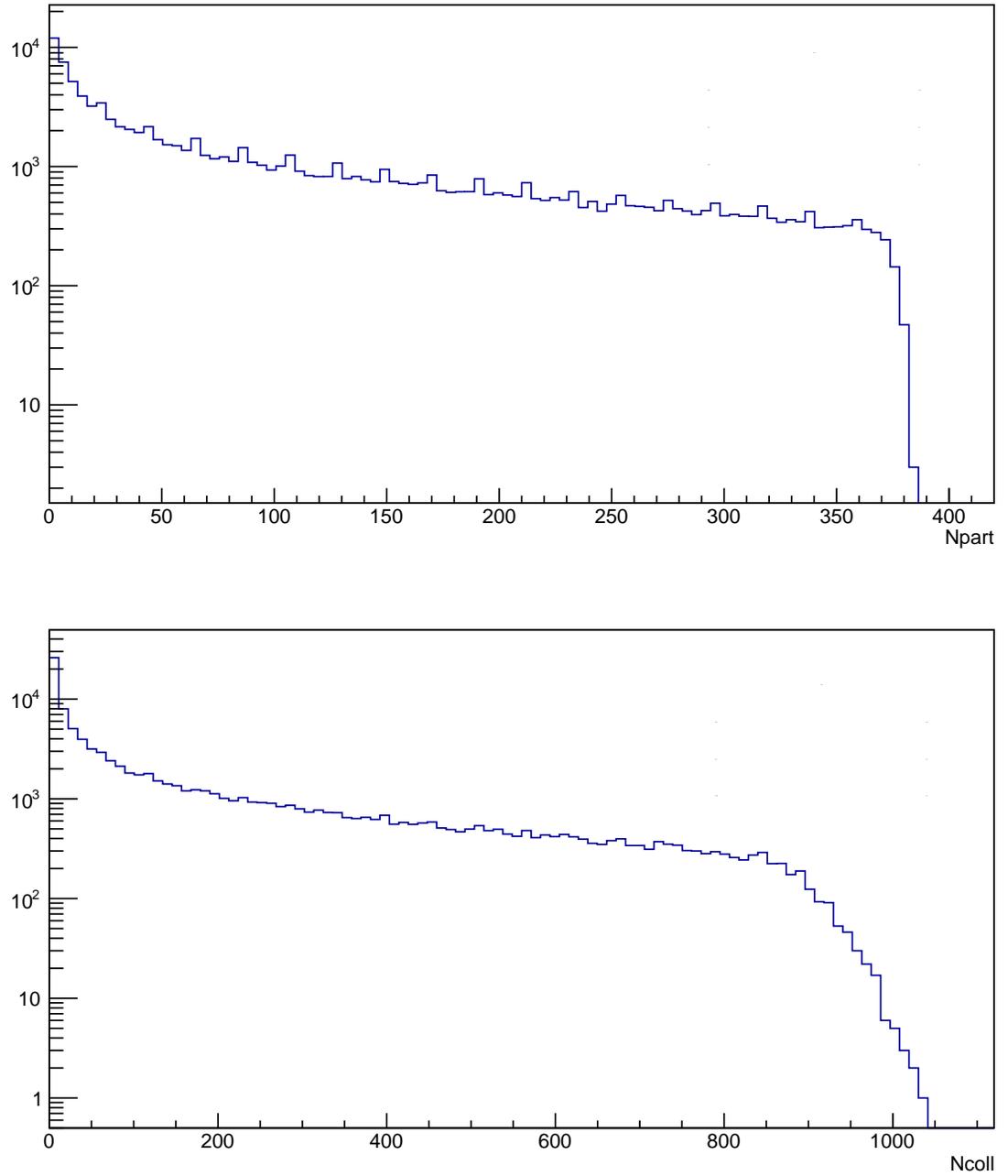


Fig. 26: Número de nucleones participantes N_{par} (histograma superior) y número de colisiones N_{col} (histograma inferior). Simulación de 100,000 eventos $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV con el código TGLauberMC, una implementación en ROOT del modelo Glauber. Los valores medios de estas distribuciones ($N_{par} = 97.18$ y $N_{col} = 183.4$) son usados como datos de entrada al momento de hacer el ajuste a la distribución de multiplicidad con la distribución binomial negativa en conjunto con el modelo Glauber.

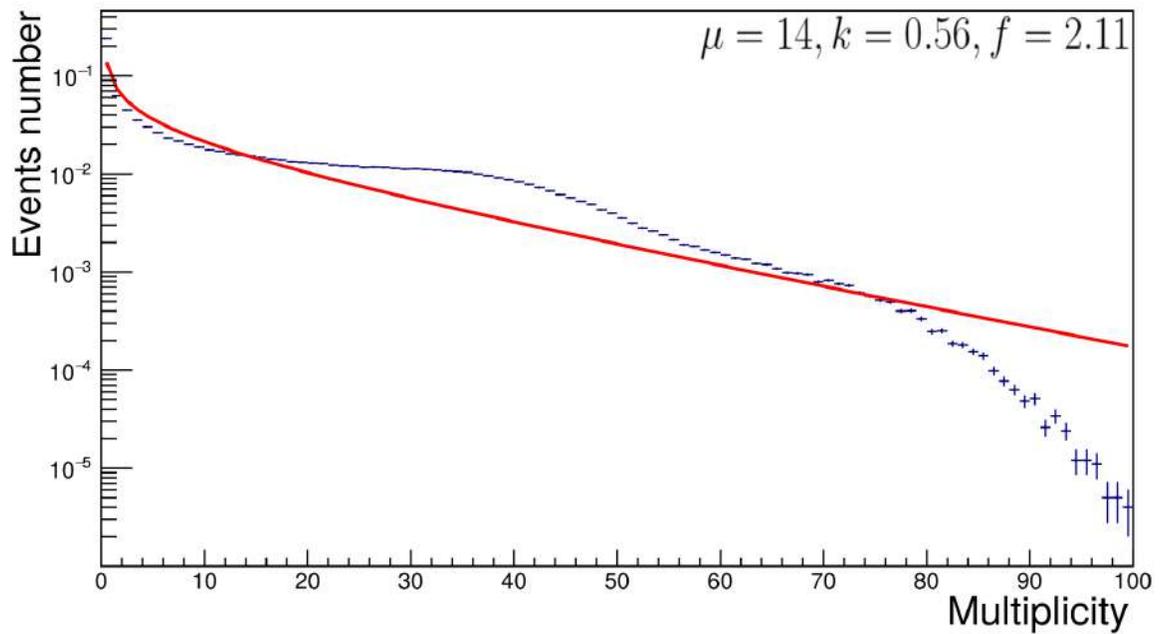


Fig. 27: Ajuste a la distribución de multiplicidad medida en los anillos externos del detector BeBe. Ajuste mediante la distribución binomial negativa y el modelo Glauber. Los valores de multiplicidad están asociados a un cierto número de antecesores, cuya probabilidad es descrita por la NBD. Los valores de los parámetros obtenidos son $\mu = 14$, $k = 0.56$ y $f = 2.11$.

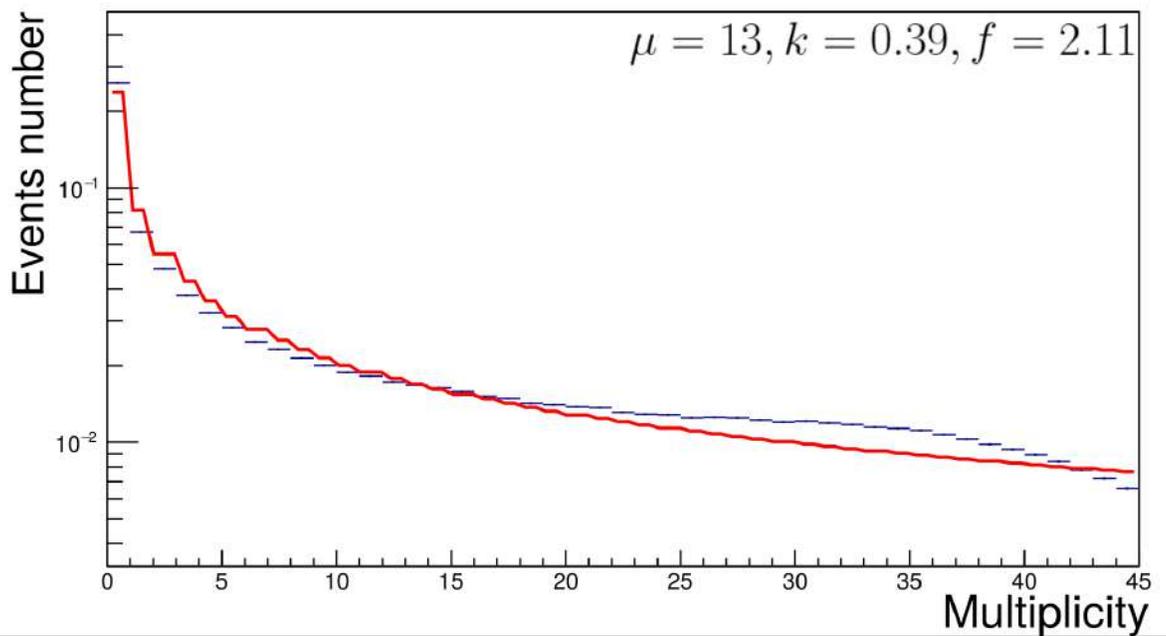


Fig. 28: Ajuste a la distribución de multiplicidad medida en los anillos externos del detector BeBe, con un corte para omitir a eventos de multiplicidades superiores a 45. Ajuste mediante la distribución binomial negativa y el modelo Glauber. Los valores de multiplicidad están asociados a un cierto número de antecesores, cuya probabilidad es descrita por la NBD. Los valores de los parámetros obtenidos son $\mu = 13, k = 2.11$ y $f = 0.39$.

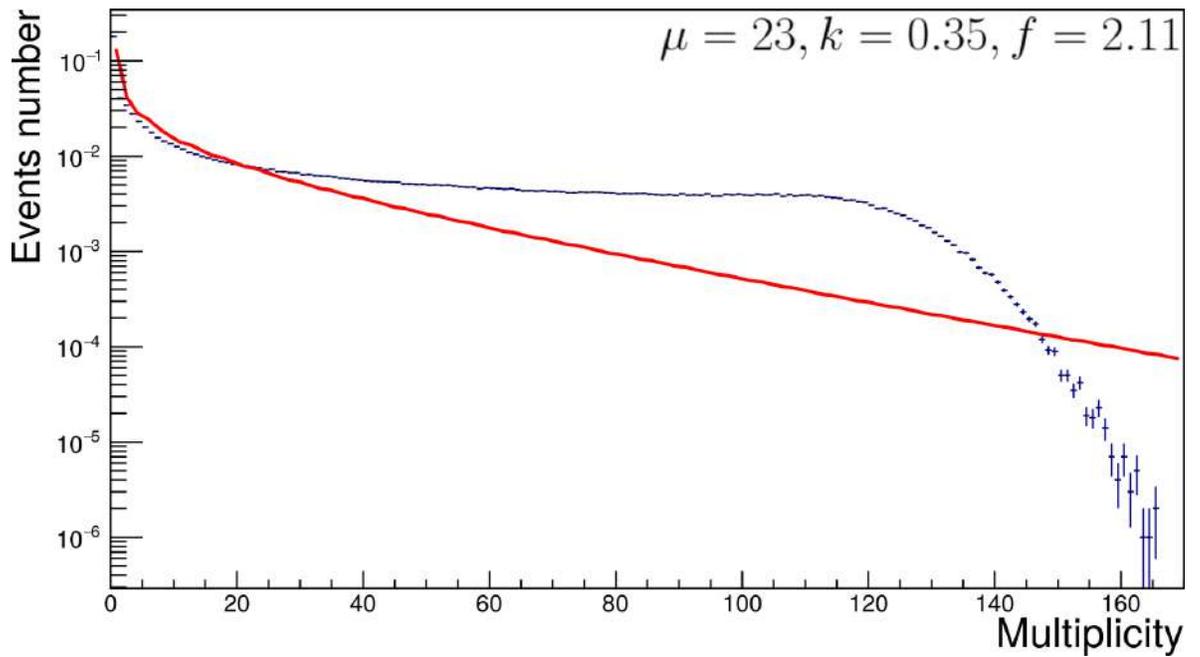


Fig. 29: Ajuste a la distribución de multiplicidad correspondiente a la simulación sin detector, en la región de pseudorapidez de los anillos externos de BeBe. Ajuste mediante la distribución binomial negativa y el modelo Glauber. Los valores de multiplicidad están asociados a un cierto número de antecesores, cuya probabilidad es descrita por la NBD. Los valores de los parámetros obtenidos son $\mu = 23$, $k = 0.35$ y $f = 2.11$.

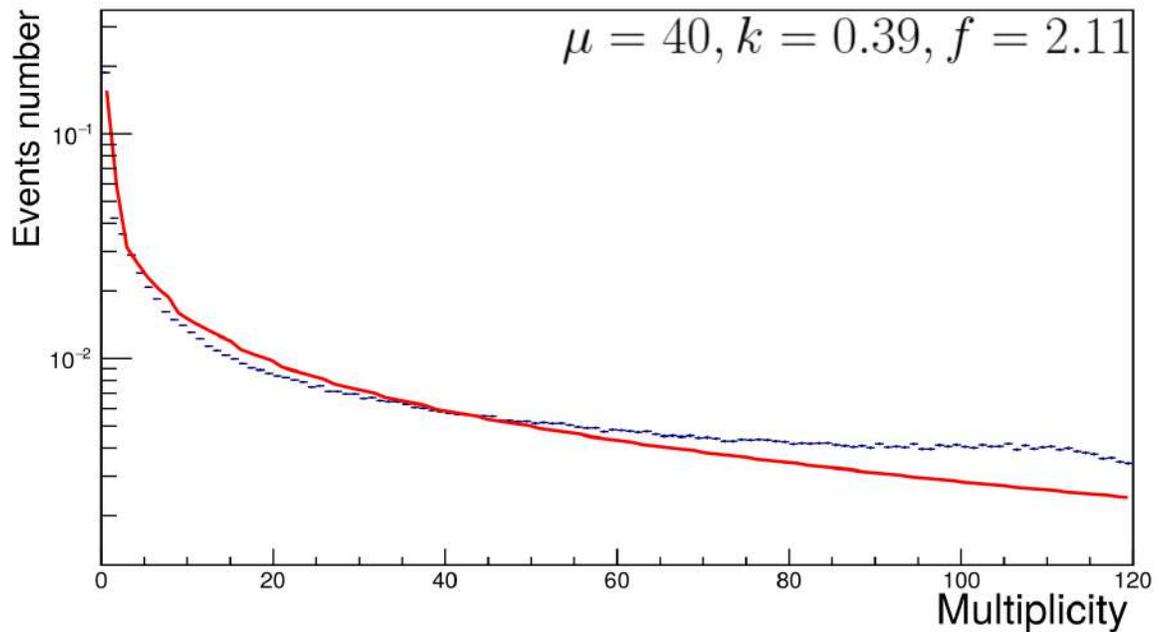


Fig. 30: Ajuste a la distribución de multiplicidad correspondiente a la simulación sin detector, en la región de pseudrapidez de los anillos externos de BeBe. Con un corte para omitir a eventos de multiplicidades superiores a 120. Ajuste mediante la distribución binomial negativa y el modelo Glauber. Los valores de multiplicidad están asociados a un cierto número de antecesores, cuya probabilidad es descrita por la NBD. Los valores de los parámetros obtenidos son $\mu = 40$, $k = 0.39$ y $f = 2.11$.

CONCLUSIONES

El detector BeBe puede ser empleado para determinar la centralidad de colisiones de iones pesados relativistas mediante la multiplicidad de las partículas cargadas capturadas. Este estudio se abordó mediante dos enfoques. En el primero, se obtuvieron los valores del parámetro de impacto mediante UrQMD y la multiplicidad simulada en el detector mediante MPDROOT, lo cual permitió clasificar los eventos en distintas clases de centralidad, para las cuales se calcularon los valores medios de N_{par} y N_{col} mediante el modelo Glauber. En el segundo enfoque se ajustó la distribución binomial negativa acoplada con el modelo Glauber a la distribución de multiplicidad simulada en MPDROOT. Para cada tipo de sistema y energía es necesario determinar qué regiones de BeBe pueden ser empleadas para los estudios de centralidad. En el presente trabajo, los análisis principales fueron realizados para colisiones *minimum bias* $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$. Este trabajo permite concluir que para las condiciones dadas deben emplearse los anillos 3, 4, 5 y 6 para determinar la centralidad mediante los enfoques abordados. En dicha región de BeBe hay una relación aproximadamente lineal entre el parámetro de impacto y la multiplicidad, la cual permite realizar este estudio. Por otra parte, los resultados sugieren emplear el anillo 1 para determinar la centralidad mediante la energía depositada por los protones espectadores, sin embargo, más estudios son necesarios para comprobar esta idea.

En el primer enfoque se logró realizar la conexión entre la multiplicidad y el parámetro de impacto. De modo que es posible estimar la centralidad a partir de una distribución de multiplicidad medida en BeBe. No obstante, en el otro método es necesario realizar una mejor interfaz entre la multiplicidad medida de BeBe y el modelo Monte Carlo Glauber, de modo que para cada clase de centralidad sea posible determinar los valores del parámetro de impacto. Así, se desarrollaron una serie de códigos que permiten determinar la centralidad mediante la multiplicidad del detector.

Recientemente, se decidió que se colisionarán núcleos de bismuto en el experimento MPD-NICA, por lo que en el anexo se muestran resultados previos de las clases de centralidad, resultando valores similares a los obtenidos para el sistema $Au + Au$, lo cual es de esperarse, dado que el radio nuclear y el número de nucleones de ambos sistemas son similares.

Entre las actividades complementarias al presente trabajo de tesis, resultó la participación en un artículo de la colaboración MexNICA sobre BeBe [28]. Además, los resultados de este trabajo serán publicados en el reporte de diseño conceptual (CDR, de sus siglas en inglés Conceptual Design Report) de BeBe y las estimaciones de centralidad fueron empleadas para estudios referentes al plano del evento. Por otra parte, las estimaciones de centralidad fueron empleadas para estudios de multiplicidad que fueron publicados en el CDR de miniBeBe [30]. Parte de los estudios de centralidad se realizaron en una estancia de investigación bajo la supervisión del Dr. Oleg Rogachevsky en las instalaciones del Laboratorio de Altas Energías del JINR. En esta estancia se logró programar el algoritmo para estimar las clases de centralidad mediante la multiplicidad de BeBe, así como una caracterización de la física del detector. Para dicha estancia se contó con el apoyo en recursos tanto del DIFUS, como de CONACyT, y del JINR. Mientras que el DIFUS, a través del Departamento de Ciencias Exactas y Naturales, facilitó la compra del boleto del vuelo a Rusia, CONACyT proporcionó la beca de movilidad y el JINR brindó tanto hospedaje como un apoyo complementario para los gastos de manutención.

Como actividades complementarias, se participó en la programación y análisis de un sistema despertador miniBeBe para el mismo experimento, en el entorno de trabajo de MPDROOT. También se participó en la elaboración de un manual de MPDROOT referente a la instalación de los detectores propuestos por MexNICA, así como la manipulación de dicho software. Este manual se encuentra en el anexo. Además, se contribuyó en la creación y actualización del repositorio del experimento MPD-NICA dedicado para el desarrollo de BeBe y mini-BeBe en el software MPDROOT.

El clúster del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM fue un recurso importante para los resultados, pues permitió producir las simulaciones de 1,000,000 de eventos de colisiones $Au + Au$ que fueron empleadas para los análisis finales de centralidad. Por otra parte, estos estudios fueron reportados constantemente con MexNICA y han sido presentados por miembros de la colaboración en distintos eventos del experimento MPD. Otra actividad fue la participación en el taller de MPDROOT en la UAS, en el cual se guió a otros estudiantes en la operación de dicho software.

En el anexo se encuentra una breve descripción de los códigos principales desarrollados durante los estudios de maestría. También se especifica la dirección del repositorio donde se agregaron dichas macros, así como los documentos de las presentaciones dadas en este periodo.

GLOSARIO

- **JINR:** Centro de investigación en física nuclear en Dubná, Rusia. De sus siglas en inglés, Joint Institute for Nuclear Research.
- **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.
- **BeBe:** Detector de monitoreo de haz, de sus siglas en inglés *Beam-beam monitoring detector*.
- **miniBeBe:** Sistema despertador diseñado para el experimento MPD-NICA.
- **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:** Calorímetro 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.
- N_{col} : Número de colisiones que sufren los nucleones.
- N_{par} : Número de nucleones que intervienen en la colisión.
- N_{an} : Número de fuentes de producción de partículas. Es un parámetro que depende de N_{col} y/o de N_{par} .
- **Parámetro de impacto:** Distancia entre el centro de dos núcleos que colisionan.
- **Minimum bias:** Eventos que pueden tener un parámetro de impacto entre $b_{min} = 0$ y $b_{max} > R_p + R_t$ [34].
- **NBD:** Distribución binomial negativa, de sus siglas en inglés *Negative Binomial Distribution*.
- **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 interacción. De sus siglas en inglés, Ultra-relativistic-Quantum-Molecular-Dynamics.
- **MPDROOT:** Software que está siendo desarrollado para simulación y análisis del experimento MPD-NICA.
- **Simulación standalone:** Simulación de eventos la cual no se considera la presencia de detectores.

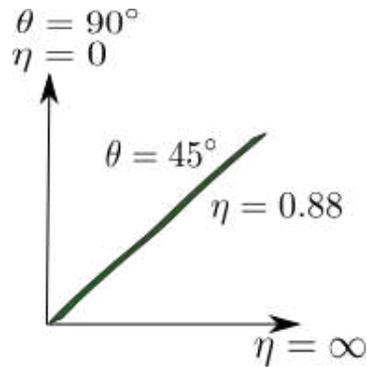


Fig. 31: Esquema de pseudorapidez. Donde el haz está en la dirección $\theta = 0$ o $\eta = \infty$.

- **Hit:** Partícula que cumple una serie de criterios para considerar que fue detectada. En este trabajo de tesis un *hit* es aquella partícula que atraviesa por completo el material de BeBe.
- **Pseudorapidez:** Coordenada espacial que describe el ángulo de la partícula respecto al eje del haz (31) de la forma: $\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right)$, donde el eje del haz está en la dirección $\theta = 0$.
- $A + A$: Colisión entre dos núcleos del mismo tipo, donde A es el número de núcleos que les componen.
- $p + p$: Colisión entre dos protones.
- $p + A$: Colisión entre núcleos y protones.
- **Bin:** Bloque en el cual se dividen los valores de un histograma. Los bins de un histograma pueden ser de tamaño variable o pueden tener el mismo tamaño. En este trabajo de tesis se usaron los mismos tamaños para los bins de cada histograma.

ANEXO

Las simulaciones son esenciales en la etapa actual del experimento MPD-NICA, pues permiten caracterizar la física y determinar el alcance de los detectores que le conformarán. La construcción de un detector inicia con simulaciones donde se ponen a prueba distintas soluciones que permiten mejorar el diseño de dicho experimento. Los generadores MC son programas que simulan la producción y los decaimientos de partículas que ocurren en colisiones a altas energías. Una vez que las partículas se han generado, el siguiente paso es entender cómo son capturadas en un detector [35]. Por ello se hará una breve revisión tanto del generador, como de la simulación del detector empleadas en este trabajo de tesis. Con un enfoque principal en la operación tanto de UrQMD como de MPDROOT. En las siguientes secciones también se revisará el modelo Monte Carlo Glauber.

Por otra parte, en el presente año se decidió que MPD-NICA colisionará iones de bismuto, por lo cual además se presentan resultados previos de la determinación de centralidad de eventos $B_i + \bar{B}_i$.

7.1 URQMD

UrQMD es un generador que permite controlar parámetros relevantes de las colisiones, tales como el tipo de sistema, el número de eventos, el rango del parámetro de impacto y la energía de la colisión. En las siguientes líneas se muestra un ejemplo de un código donde se pueden controlar estos parámetros para la simulación. Con la intención de simular las condiciones del experimento NICA, se consideran eventos *minimum bias* (0 a 16 *fm*), a una energía de 11 *GeV*.

```
pro 197 79 #
tar 197 79 #
nev 10000 #Número de eventos.
imp -16.0 #Parámetro de impacto de 0 a 16 fm.
ecm 11. #Energía en el sistema de referencia del sistema.
tim 200 200 #Tiempo de evolución del sistema.
eos 0 #Ecuación de estado. Modo cascada sin potencial.
f13
#f14
f15
f16
f19
f20
#CTOption(41)=1
cto 41 1
xxx
```

- *pro 197 79*: Número total de nucleones (izquierda) y número de protones (derecha) del sistema proyectil.

- *tim* 200 200: Tiempo de evolución del sistema en fm/C . Se escoge lo suficientemente grande para considerar tanto la hadronización de las partículas como su llegada a los distintos detectores.
- *eos* 0: Ecuación de estado empleada para el cálculo. Hay dos opciones: 0 (modo cascada sin potencial) y 1 (potencial de skyrme). La ecuación de estado de Skyrme está limitada a energías por debajo de $4GeV/nucleon$.
- *nev* 10000: Número de eventos. Se simula la mayor cantidad posible de acuerdo a los requeridos por el tipo de análisis.
- *imp* -16,0: Parámetro de impacto de 0 a 16 fm para considerar eventos $Au + Au$ *minimum bias*.
- *ecm* 11.: Energía en el sistema de referencia del sistema. Es decir, en el centro de masa del núcleo proyectil y el núcleo objetivo (para colisiones entre núcleos).
- *cto* 41 1: Archivo de salida tipo f14.
- *xxx*: Marca el final del archivo de entrada.

Las líneas f13, f14, f15 y demás, son para especificar en qué archivo se guardarán los datos de la simulación [34]. Cada archivo guarda un cierto tipo de datos. En este caso se selecciona el archivo de formato f14, pues contiene la información de interés, tales como el parámetro de impacto, la multiplicidad y la cinemática de los eventos.

7.2 MODELO GLAUBER

Las colisiones de iones pesados relativistas ocurren tan rápidamente que es imposible determinar las condiciones iniciales en las que ocurrieron. Los modelos Glauber permiten estudiar las condiciones iniciales en términos de propiedades geométricas

como el parámetro de impacto y la sección transversal. Estos modelos estudian las colisiones entre los núcleos en términos de las interacciones de sus nucleones constituyentes. Estos modelos caen en dos categorías: El modelo óptico y el modelo Monte Carlo Glauber (MCG). En el primero, se asume un perfil de densidad de nuclear continuo, comúnmente descrito por la distribución de Fermi. Es decir, esta teoría no localiza a los nucleones en coordenadas espaciales específicas. Por otra parte, en el enfoque MCG, cada nucleón se distribuye de forma aleatoria con coordenadas específicas para cada evento y las propiedades de la colisión se calculan promediando sobre múltiples eventos [21, 36]. En el resto de la sección se revisará a detalle el enfoque Monte Carlo. Más detalles del enfoque óptico pueden consultarse en las referencias [21, 37].

La idea esencial del modelo MCG es reproducir el núcleo distribuyendo sus nucleones de forma aleatoria de acuerdo a una función de densidad de carga nuclear asumiendo que hay una distancia mínima de separación entre las posiciones de los nucleones en el núcleo. Enseguida se asigna un parámetro de impacto b aleatorio entre los dos núcleos y se colisionan en el plano $x - y$, considerando que los nucleones viajan en línea recta a lo largo de la dirección z . MCG permite conocer tanto el número de colisiones entre los nucleones (N_{col}) como el número de nucleones que participaron en dichas colisiones (N_{par}) para un parámetro de impacto dado.

La posición de los nucleones es determinada por una función de densidad nuclear, modelada por la forma funcional de Woods-Saxon:

$$\rho(r) = \rho_0 \frac{1 + w(r/R)^2}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)}$$

Donde los parámetros están basados en datos de experimentos de dispersión de electrón-núcleo a bajas energías [21]. Cabe destacar que se asume que los protones y neutrones tienen el mismo perfil de densidad. El parámetro ρ_0 es la densidad de los

nucleones, que provee una normalización. R es el parámetro del radio del núcleo y a es el grosor del núcleo, el cual indica qué tan rápido cae la densidad nuclear cerca del radio del núcleo. El parámetro w es necesario para describir núcleos en los cuales la densidad máxima no se encuentra en el centro. En la figura (32) se muestra la distribución de densidad de carga nuclear de Au modelada por la distribución de Fermi, también conocida como Wood Saxon. La densidad tiende a un valor constante ρ_0 desde el centro del núcleo hasta R , conocido como radio nuclear. Luego hay una región difusa donde la densidad decae drásticamente hasta tener un valor nulo.

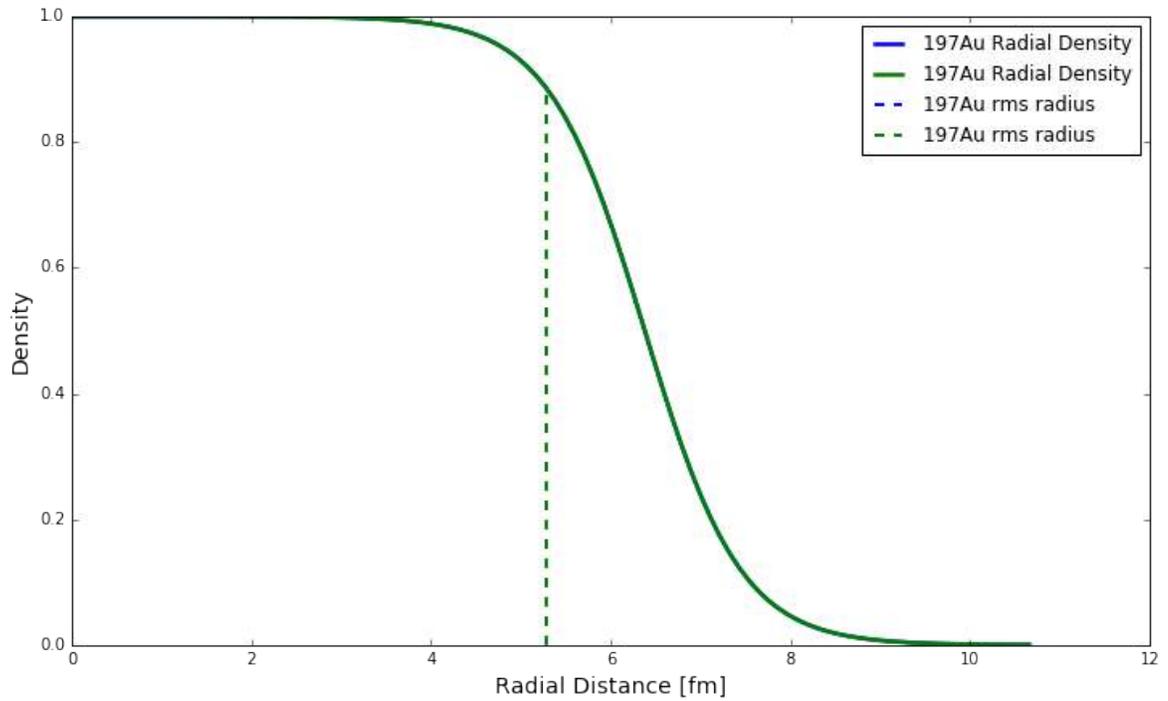


Fig. 32: Distribución de densidad de carga nuclear de Au según la función de Fermi. La región difusa del Au termina ligeramente por debajo de los 11 fm . Esta gráfica fue generada a partir del Código de Python del proyecto MCGlauber [38].

Las interacciones entre los nucleones pueden ser elásticas o inelásticas. Las interacciones elásticas tienen lugar cuando ocurre un traslape entre los nucleones, mientras que en las interacciones inelásticas no hay traslape. El MCG usa datos experimentales de entrada, siendo los más importantes la densidad de carga nuclear, medida en expe-

rimentos de dispersión a bajas energías y la dependencia de la energía de la sección transversal inelástica nucleón-nucleón.

Se ve que la región difusa del *Au* termina ligeramente por debajo de los 11 *fm*. Esta gráfica fue generada a partir del Código de Python del proyecto MCGlauber [38].

El modelo MCG se resume en los siguientes puntos:

- Se modelan los núcleos ubicando sus respectivos nucleones mediante muestras de una función de densidad de carga nuclear asumiendo una distancia mínima de separación entre las posiciones de los nucleones.
- Se asigna de forma aleatoria un parámetro de impacto *b* entre los dos núcleos que se colisionan.
- Se sobreponen los núcleos.

En la figura (33) se tienen eventos de colisiones *Au + Au* en diferentes condiciones. Los puntos rojos y amarillos son los nucleones participantes y los puntos azules y verdes son los nucleones espectadores. Dos figuras corresponden a eventos centrales (izquierda y centro) y una a un evento periférico (derecha). Un evento es a $\sqrt{S_{NN}} = 4$ *GeV* (izquierda) y dos eventos son a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ *GeV* (centro y derecha). El traslape entre los núcleos es mayor en el evento central de $\sqrt{S_{NN}} = 11$ *GeV* que en el evento central de $\sqrt{S_{NN}} = 4$ *GeV*, así, cuando el traslape es mayor hay más participantes y menos espectadores y se espera una mayor multiplicidad. Por otra parte, el traslape entre los núcleos es mayor en el evento central de $\sqrt{S_{NN}} = 11$ *GeV* que en el evento periférico de $\sqrt{S_{NN}} = 11$ *GeV*, por lo cual el número de participantes es mayor para el evento central y se espera una mayor multiplicidad.

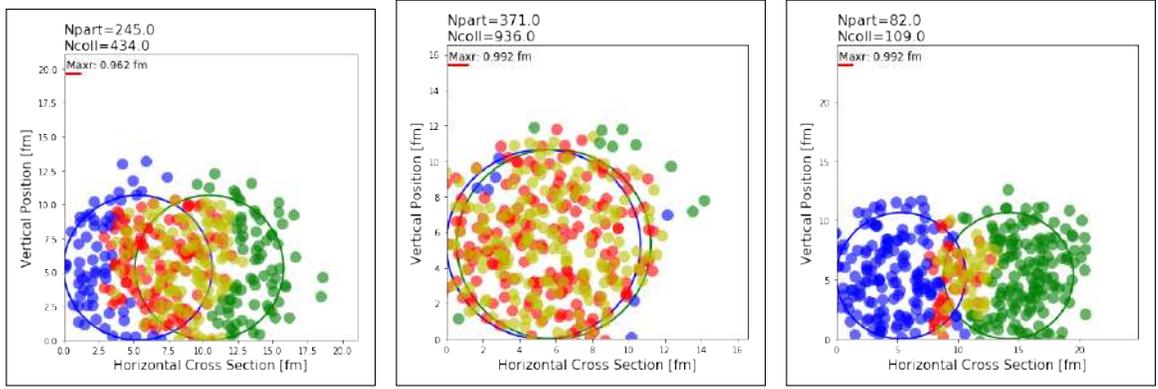


Fig. 33: Colisiones $Au + Au$ a $4 GeV$ (izquierda) y a $11 GeV$ (centro y derecha). Las figuras de la izquierda y la del centro corresponden a colisiones centrales. La figura de la derecha corresponde a una colisión periférica. Los puntos rojos y amarillos son los participantes y los puntos azules y verdes son los espectadores. El traslape entre los núcleos es mayor en la colisión central de $11 GeV$ que en la colisión central de $4 GeV$, si el traslape es mayor hay más participantes y menos espectadores, y se espera una mayor multiplicidad. Por otra parte, el traslape entre los núcleos es mayor en la colisión central de $11 GeV$ que la colisión periférica de $11 GeV$, por lo cual el número de participantes es mayor para la colisión central, y se espera una mayor multiplicidad. Estas gráficas fueron generadas mediante el modelo Glauber en el programa de Python MCGlauber[38].

7.2.1 TGlauberMC: Modelo Monte Carlo Glauber en ROOT

TGlauberMC es una implementación del modelo Monte Carlo Glauber en el entorno de trabajo de ROOT [36]. El código TGlauberMC puede ser descargado de su página web [39]. Este código permite generar eventos de distintos sistemas a energías del orden de GeV . Para este trabajo de tesis se simularon 10,000 eventos mediante el código TGlauberMC para cada clase de centralidad de eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 GeV$, obteniendo así los valores medios de N_{col} y N_{par} para cada clase. Además, se simularon 100,000 eventos *minimum bias* del mismo tipo para obtener los valores N_{col} y N_{par} que fueron empleados en el ajuste de la distribución binomial negativa acoplada al modelo Glauber. Tomando la sección transversal inelástica nucleón-nucleón como $\sigma_{NN}^{inelastica} = 32$ [21].

7.3 DISTRIBUCIÓN BINOMIAL NEGATIVA

Se supone que en una secuencia infinita de experimentos independientes la salida de cada experimento puede ser un éxito o un fracaso. También se supone que la probabilidad de éxito de cualquier experimento en particular es p ($0 < p < 1$) y la probabilidad de un fracaso es $q = 1 - p$. Entonces, estos experimentos forman una secuencia infinita de ensayos Bernoulli con parámetro p . Así, se prosigue a estudiar la distribución del número total de fracasos que ocurren antes de tener exactamente r éxitos, donde r es un entero positivo fijo. Para $n = r, r + 1, \dots$, se deja a A_n denotar que el evento del número de ensayos requeridos para obtener exactamente r éxitos es n . A_n ocurre si y solamente si ocurren exactamente $r - 1$ éxitos en los primeros $n - 1$ ensayos y el número de éxitos se obtiene en el ensayo n .

Puesto que todos los ensayos son independientes, se sigue que

$$P(A_n) = \binom{n-1}{r-1} p^{r-1} q^{(n-1)-(r-1)} p = \binom{n-1}{r-1} p^r q^{n-r}.$$

Para cualquier valor de x ($x = 0, 1, 2, \dots$), el evento en el cual ocurren x fracasos antes de obtener r éxitos es equivalente al evento del número total de ensayos $r + x$ requeridos para obtener r éxitos. En otras palabras, si X denota el número de fracasos que ocurrirán antes de obtener r éxitos, entonces $P(X = x) = P(A_{r+x})$. Si se denota $P(X = x)$ por $f(x|r, p)$, se sigue que

$$f(x|r, p) = \begin{cases} \binom{r+x-1}{x} p^r q^x & \text{para } x = 0, 1, 2, \dots \\ 0 & \text{de otra forma.} \end{cases} \quad (6)$$

Se dice que una variable aleatoria X tiene una distribución binomial negativa con parámetros r y p ($r = 1, 2, \dots$, y $0 < p < 1$) si X tiene una distribución discreta para la cual la distribución $f(x|r, p)$ está dada por la ecuación (6) [40].

Para casos donde $x > 1$ y usando la definición del coeficiente binomial se tiene

$$f(x|r, p) = \frac{(r+x-1)!}{(r-1)!x!} p^r q^x,$$

reescribiendo en términos de la función gamma resulta

$$f(x|r, p) = \frac{\Gamma(x+r)}{\Gamma(r+1)\Gamma(r)} p^r q^x,$$

recordando que $q = 1 - p$ se tiene

$$f(x|r, p) = \frac{\Gamma(x+r)}{\Gamma(r+1)\Gamma(r)} p^r (1-p)^x.$$

7.3.1 Distribución de multiplicidad descrita por la NBD

Se ha observado en distintos experimentos que las distribuciones de multiplicidad de partículas cargadas producidas en colisiones a altas energías están descritas por la distribución binomial negativa. Esta distribución ha sido probada con eventos de colisiones entre núcleos, así como para otros sistemas [41]. Para producir el número de partículas producidas por interacción, se usa la distribución binomial negativa de la forma

$$P(n) = \frac{\Gamma(n+k)}{\Gamma(n+1)\Gamma(k)} \frac{(\mu/k)^n}{(\mu/k+1)^{n+k}},$$

que da la probabilidad de medir n partículas por antecesor, donde el parámetro μ es la multiplicidad media por antecesor y k ($k \geq 0$) es un parámetro de dispersión [13]. Más detalles sobre la multiplicidad y la distribución binomial negativa pueden revisarse en las referencias [13, 42].

7.4 PRUEBA χ^2 : ¿QUÉ TAN BUENO ES EL AJUSTE?

Un problema común en los trabajos estadísticos es la prueba de compatibilidad de un conjunto de frecuencias observadas y teóricas. Por ejemplo, se considera que un dado es lanzado 60 veces. Si el dado no tiene preferencia por alguno de sus lados, la probabilidad de que resulte cada una de sus caras es $1/6$ en un solo lanzamiento. Entonces, se espera que cada cara aparezca 10 veces en un experimento de este tipo. Se supone que el experimento produce los resultados de la tabla (??), donde o representa las frecuencias observadas y e representa las frecuencias esperadas. Como medida de compatibilidad entre las frecuencias observadas y esperadas, es usual calcular la cantidad llamada χ^2 , la cual es definida por

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}, \quad (7)$$

donde k es el número de pares de frecuencias a comparar, o_i y e_i denotan el i -ésimo par de frecuencias observadas y esperadas. Además, $\sum o_i = \sum e_i = n$. En este problema $k = 6$ y

$$\chi^2 = \frac{(15 - 10)^2}{10} + \frac{(7 - 10)^2}{10} + \frac{(4 - 10)^2}{10} + \frac{(11 - 10)^2}{10} + \frac{(6 - 10)^2}{10} + \frac{(17 - 10)^2}{10} = 13.6$$

Con un valor de χ^2 de 0 se tiene exactamente el valor esperado, mientras que valores grandes de χ^2 corresponden a resultados experimentales pobres. Si este experimento se repite un gran número de veces con un dado sin caras preferidas, cada vez que se calcule el valor de χ^2 , se obtendrá un conjunto de valores que podrán ser clasificados en una tabla de frecuencias. Esta tabla de frecuencias indica aproximadamente en qué porcentaje de tales experimentos se podría obtener varios rangos de valores de χ^2 . De esta forma se puede juzgar que el valor de $\chi^2 = 13.6$ es inusualmente grande comparado con los valores de χ^2 obtenidos en experimentos con un dado sin preferencia por alguna cara. Si el porcentaje de experimentos para los cuales $\chi^2 > 13.6$ es muy pequeño, por ejemplo inferior al 5 %, entonces se puede decir que las frecuencias observadas no son compatibles con las frecuencias esperadas para un dado sin preferencia por alguna cara, de modo que se puede concluir que el dado tiene preferencia por una o varias caras. Esta discusión aborda cómo se procedería empíricamente para encontrar una aproximación de la función de frecuencia de χ^2 para un problema en particular. Sin embargo, usando la distribución multinomial es posible encontrar la función de frecuencia exacta de χ^2 para tal problema. Más detalles de la distribución χ^2 pueden consultarse en el libro [43].

7.5 A BRIEF GUIDE TO MPDROOT

MPDROOT is a detector simulation and reconstruction, and data analysis framework developed for the MPD-NICA experiment and based on FairRoot. This software can be installed by following the instructions at the MPD website [17]. MPDROOT simulates particles and interactions, detectors geometries, interactions of particles with matter and electromagnetic fields. Detailed information is available at the MPD website [19, 44]. Updates to this document, macros, detector classes, and other files can be consulted at the GitLab of the MexNICA Physics Analysis and Offline group [45].

Installing BeBe

After MPDROOT installation is finished, we can proceed to add BeBe, which is called *bmd* (beam monitoring detector) in the MPDROOT context. First, the BeBe files should be downloaded from the GitLab repositories, and we have to add them in two different directories. The geometry root file must be added to the directory *.../mpdroot/geometry/*, and the rest of the files (*BmdDetector.cxx*, *BmdDetector.h*, *BmdPoint.cxx*, and *BmdPoint.h*) will replace their old versions at */mpdroot/bmd/*.

Libraries are loaded in the macro *mpdloadlibs*, which is located at *...mpdroot/macro/mpd/*. We have to add *bmd* libraries with next code line:

```
gSystem->Load("libbmd");
```

Comments: Due that MPDROOT is constantly being upgraded, sometimes it is necessary to modify files according to the software changes. Usually, you will know what to correct given the errors after compiling or running the transporting macro. On the other hand, even if the compilation does not have errors, occasionally some libraries are not created correctly, and it could work to delete the *build* directory and to compile MPDROOT again. It is also important to check out the commits in the NICA GitLab [46] to see the new changes.

MPDROOT simulation

In order to transport the generated particles through the detectors, we have to run the macro *runMC.C* located at *...mpdroot/macro/mpd/*. Before running this macro it is necessary to adjust some code lines, and to choose the detectors in the *geometrystage1.C* macro, located at the same directory. All the detectors are activated as default,

but we only need BeBe or MBB. The first thing to do is to include BeBe with next lines in *geometrystage1.C*:

```
FairDetector *Bmd = new BmdDetector("BMD",kTRUE );
Bmd->SetGeometryFileName("bbc_hex_5cm_NDetScin_v1.root");
fRun->AddModule(Bmd);
```

The rest of the MPD must be turned off by commenting the *fRun->AddModule()*; line for each detector, but basic MPD elements should remain activated for the simulation. Specifically the cave, pipe, and magnet, as we can see in next code lines:

```
FairModule *Cave= new FairCave("CAVE");
Cave->SetGeometryFileName("cave.geo");
fRun->AddModule(Cave);
```

```
FairModule *Pipe= new FairPipe("PIPE");
Pipe->SetGeometryFileName("pipe.geo");
fRun->AddModule(Pipe);
```

```
FairModule *Magnet= new FairMagnet("MAGNET");
Magnet->SetGeometryFileName("magnet_v5.root");
fRun->AddModule(Magnet);
```

```
FairDetector *Bmd = new BmdDetector("BMD",kTRUE );
Bmd->SetGeometryFileName("bbc_hex_5cm_NDetScin_v1.root");
fRun->AddModule(Bmd);
```

Note: For a more realistic simulation of the MPD the rest of the detectors can be activated.

The next step is to prepare the transport macro by specifying the inputfile path of generated particles, the particle generator, and the transport package. The supported generators are UrQMD, LQGSM and BOX. The supported transport packages are geant3 and geant4. In the next lines, we can see an example for choosing geant3 and UrQMD:

```
#define URQMD // Choose generator.  
#define GEANT3 // Choose: GEANT3 GEANT4
```

BBC version

An independent version of BeBe can be installed in the same way that we did before. The files can be downloaded from the GitLab repository. Now, instead of copying the files at */mpdroot/bmd*, we will put them at the */mpdroot/bbc* directory. The main differences between these versions are the hits selection considerations. While for the BMD, a hit is any charged particle that goes through a BeBe-cell completely, for the BBC, a hit is any nonzero energy charged particle that arrived in any cell.

- The bmd flaw is that we will lose some particles that deposite all their energy at the BeBe, but they are detected.
- The bmd advantage is that we are sure that selected hits have a high probability of being detected.
- The bbc flaw is that we will select some particles that have a low probability of being detected.
- The bbc advantage is that we will recover some particles.

We can see and change these considerations in *BmdDetector.cxx* and *MpdBbc.cxx* files.

For bbc

```
if(gMC->IsTrackEntering())
```

For bmd

```
if( fELoss > 0. && (gMC->IsTrackExiting() || gMC->IsTrackStop() ||  
gMC->IsTrackDisappeared()) && gMC->TrackCharge() ) {
```

```
    BmdPoint* p=AddHit(fTrackID, fVolumeID, fPos.Vect(),
```

```
    fMom.Vect(), fTime,  
    fLength, fELoss);  
    p->SetStep(gMC->TrackStep());  
    ((FairStack*)gMC->GetStack())->AddPoint(kBMD);  
    ResetParameters();
```

```
}
```

Hits can be recovered if we only consider next lines:

```
fELoss    = 0.;  
    fTime    = gMC->TrackTime() * 1.0e09;
```

MINI BEBE

We can proceed to add mini BeBe, which is called MBB (inner beam-beam monitoring detector) in the MPDROOT context. First, the MBB files should be downloaded from the GitLab repository, and then add them to two different directories. The root file *mbbv1.root* must be added to the directory *.../mpdroot/geometry/*, and the rest of the files (*MbbDetector.cxx*, *MbbDetector.h*, *MbbPoint.cxx*, *MbbPoint.h*, *MbbGeo.cxx*, *MbbGeo.h*, *MbbGeoPar.cxx*, *MbbGeoPar.h*, *mbbLinkDef.h*, and *CMakeLists.txt*) should be located at */mpdroot/mbb/*.

Libraries are loaded in macro *mpdloadlibs.C*, which is located at *...mpdroot/macro/mpd/*. We have to add mbb libraries with next code line:

```
gSystem->Load("libmbb");
```

Next thing to do is to specify mbb directory address by adding the line

```
add_subdirectory (mbb)
```

in the file *CMakeLists.txt* located at *.../mpdroot/*.

MBB should be added on *MpdDetectorList* file located at *.../mpdroot/mcstack* as we see in the next line:

```
enum DetectorId {kSTS, kTPC, kTOF, kETOF, kFFD, kECT, kECAL,  
kNDET, kCPC, kBBC, kZDC, kFSA, kSFT, kBMD, kMBB, kRECOIL};
```

Before running the transport macro, we need to include MBB in *geometrystage1.C*, by adding the next lines:

```
FairDetector *Mbb = new MbbDetector("MBB", kTRUE);  
Mbb->SetGeometryFileName("mbb_v1.root");  
fRun->AddModule(Mbb);
```

Note: Since April 2020 MBB was included in the NICA repository [47].

ANALYSIS MACROS

Analysis macros can be downloaded from the GitLab repositories. With them, we can produce a characterization of BeBe and MBB detectors through the study of observables such as multiplicity, p_T , η , *Energy*, and time of flight. We can also produce centrality determination studies.

These macros can be used with both BMD and BBC, and they can be adapted for MBB as well. We can study several observables of these detectors through the classes *BmdPoint*, *MpdBbcPoint*, and *MbbPoint*. We can reproduce Monte Carlo studies with *MCTrack*, and study each event condition through *MCEventHeader* too.

More macros can be found at */mpdroot/macro/*. Additional information is available at the quick guide *README* located at *mpdroot/macro/physicalanalysis/Flow*. Finally, more macros related to the MPD experiment can be found at the MPD website [48].

NOTE: On recent MPDROOT updates (January 2020), some changes are needed on the analysis macros: it is necessary to change the tree name from *cbmsim* to *mpdsim* and the class name *FairMCTrack* by *MpdMCTrack*.

7.6 CLASES DE CENTRALIDAD: ANÁLISIS PARA OTROS SISTEMAS

En esta sección se determinarán las clases de centralidad para distintas condiciones a las estudiadas anteriormente. Primero para eventos de colisiones $Au + Au$ en las mismas condiciones, pero considerando todos los anillos de BeBe. Luego para eventos de colisiones $Bi + Bi$, pues se ha decidido que será uno de los sistemas a colisionar en MPD-NICA.

7.6.1 *Eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$*

En el capítulo 3 se concluyó que para los estudios de centralidad mediante la multiplicidad de BeBe se deben emplear los anillos externos, debido a que dicho enfoque parte de que hay una correlación aproximadamente lineal entre la multiplicidad y la centralidad, de modo que la multiplicidad incrementa conforme los eventos son más centrales. Sin embargo, al usar los anillos internos se considera a los protones espectadores cuya correlación de multiplicidad es inversa a la deseada, por lo cual se prosigue a omitir los anillos 1 y 2 del detector. La desventaja de este enfoque es que se pierden eventos periféricos. Así, en esta sección se realiza el mismo estudio de centralidad considerando a todos los anillos de BeBe (34), lo cual permitirá recuperar los eventos periféricos, con la desventaja misma de que en este tipo de eventos la correlación entre la multiplicidad y la centralidad no es la deseada.

Al ajustar la distribución binomial negativa a la distribución de multiplicidad de BeBe se nota que describía bien la región de multiplicidades de 0 a 45. Con esta motivación, se estiman las clases considerando a dicha región (35). En la tabla (9) se encuentran los valores de las clases de centralidad considerando un corte de multiplicidades superiores a 45, siendo similares a las calculadas sin el límite a dicha región. De forma

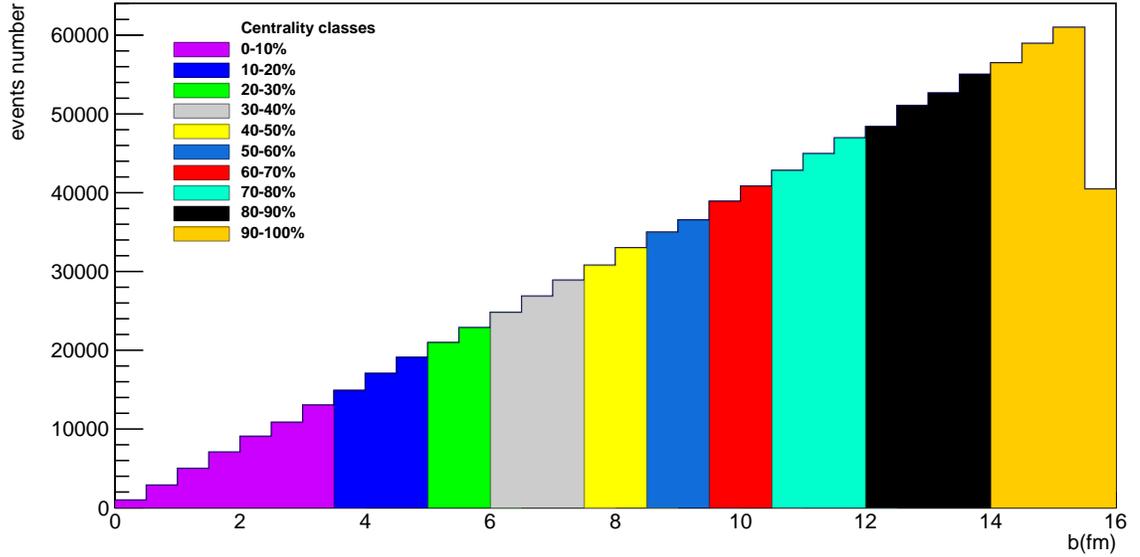


Fig. 34: Clases de centralidad usando la multiplicidad de todos los anillos de BeBe para colisiones $Au + Au$ a $11 GeV$.

análoga, lo anterior se nota al determinar las clases de multiplicidad (36), cuyos valores se mantienen similares para las clases de 10% hasta 100%. En este caso la clase de 0 – 10% cambia solamente en su límite inferior debido al corte de multiplicidad.

7.6.2 Eventos de colisiones $Bi + Bi$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 GeV$

Las simulaciones de esta subsección son de 25,000 eventos de colisiones $Bi + Bi$ *minimum bias* a $11 GeV$. En la figura (37) se muestran las clases de centralidad en términos de la multiplicidad y el parámetro de impacto para eventos de tipo $Bi + Bi$. En la tabla (10) se especifican los valores de las clases, los cuales son similares a los obtenidos en colisiones de tipo $Au + Au$, pues cada núcleo de bismuto tiene un número de nucleones similar a los núcleos de oro.

Clases de centralidad para eventos de colisiones $Au + Au$

Clase	b inferior (fm)	b superior (fm)
0-10	0	3.6405
10-20	3.6405	5.1795
20-30	5.1795	6.4295
30-40	6.4295	7.5505
40-50	7.5505	8.6305
50-60	8.6305	9.7395
60-70	9.7395	10.9395
70-80	10.9395	12.3405
80-90	12.3405	14.0295
90-100	14.0295	15.8005

Tab. 8: Clases de centralidad de eventos de colisiones $Au + Au$, considerando todos los anillos de BeBe.

Clases de centralidad para eventos de colisiones $Au + Au$

Clase	b inferior (fm)	b superior (fm)	$\langle N_{par} \rangle$	$\langle N_{col} \rangle$
0-10	0	2.9205	348.5	823
10-20	2.9205	4.1705	301.8	677.4
20-30	4.1705	5.1595	261.1	558.8
30-40	5.1595	6.0505	223.9	459.7
40-50	6.0505	6.8895	188.6	362.1
50-60	6.8895	7.7195	153.3	279
60-70	7.7195	8.5905	123.1	204.5
70-80	8.5905	9.5695	90.96	136.4
80-90	9.5695	10.8405	57.24	73.43
90-100	10.8405	14.9895	15.33	14.72

Tab. 9: Clases de centralidad obtenidas mediante la multiplicidad de los anillos externos (3, 4, 5, y 6) de BeBe. Considerando un corte para los eventos de multiplicidad superior a 45, correspondientes a las colisiones más centrales.

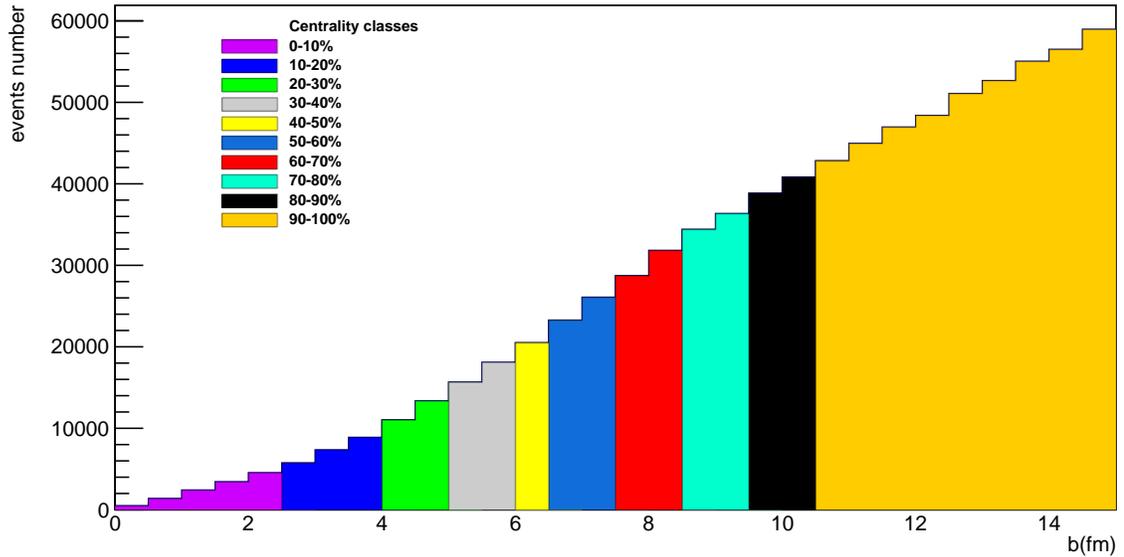


Fig. 35: Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. Considerando un corte en los eventos de multiplicidades superiores a 45, correspondientes a las colisiones de tipo centrales, para las cuales la multiplicidad es baja.

7.6.3 Eventos de colisiones $Bi + Bi$ a $\sqrt{S_{NN}} = 9 \text{ GeV}$

En la figura (38) se muestran las clases de centralidad para 1,000,000 de eventos de colisiones $Bi + Bi$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 9 \text{ GeV}$ y en la tabla (11) se tienen los valores correspondientes del parámetro de impacto. Estos resultados corresponden a una simulación sin detector considerando todo el espacio fase, de modo que cubren todo el rango del parámetro de impacto incluyendo a eventos periféricos.

7.7 MACROS PARA ESTUDIOS DE CENTRALIDAD

Las macros principales desarrolladas por el presente para producir los análisis de los capítulos 3 y 4, así como los archivos root de las distribuciones de multiplicidad y de parámetro de impacto, se encuentran en el repositorio de GitLab [49]. Otras

Clases de centralidad para eventos de colisiones $Bi + Bi$

Clase	b inferior (fm)	b superior (fm)
0-10	0	2.9005
10-20	2.9005	4.0995
20-30	4.0995	5.0705
30-40	5.0705	6.0005
40-50	6.0005	6.8605
50-60	6.8605	7.6995
60-70	7.6995	8.5795
70-80	8.5795	9.6405
80-90	9.6405	10.9605
90-100	10.9605	15.2505

Tab. 10: Clases de centralidad de eventos $Bi + Bi$ a 11 GeV , considerando anillos externos (3, 4, 5, y 6) de BeBe.

Clases de centralidad para eventos de colisiones $Bi + Bi$

Clase	b inferior (fm)	b superior (fm)
0-10	0	3.2505
10-20	3.2505	4.8005
20-30	4.8005	6.1195
30-40	6.1195	7.3695
40-50	7.3695	8.6305
50-60	8.6305	9.9795
60-70	9.9795	11.4305
70-80	11.4305	12.9705
80-90	12.9705	14.5295
90-100	14.5295	15.9895

Tab. 11: Clases de centralidad usando la multiplicidad de todo el espacio fase para colisiones $Bi + Bi$ a 9 GeV .

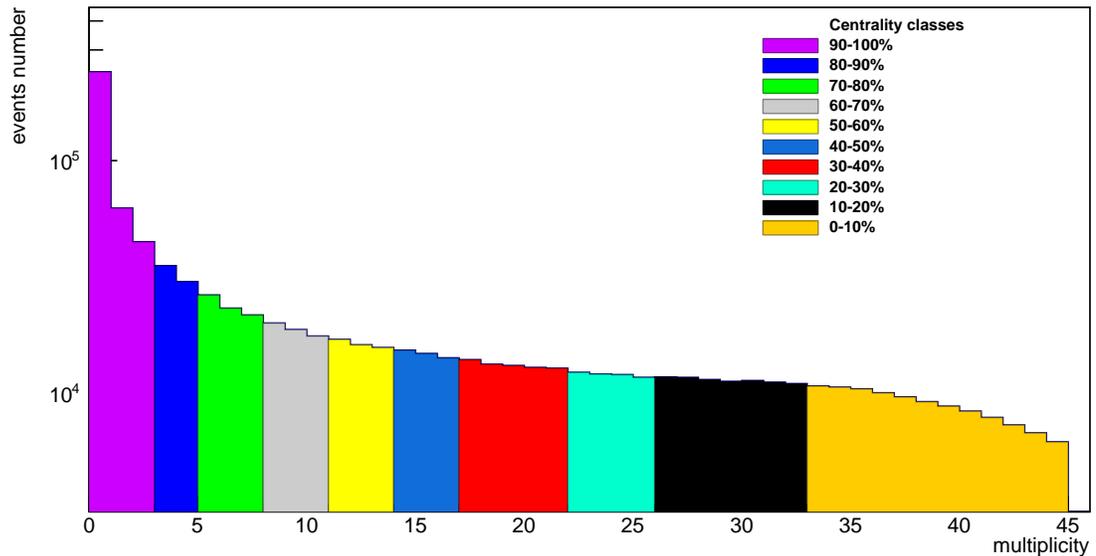


Fig. 36: Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. Considerando un corte para los eventos de multiplicidad superior a 45, correspondientes a las colisiones más centrales.

versiones de estas macros y códigos complementarios se encuentran en el repositorio [45]. Finalmente, las contribuciones en los repositorios de MPDROOT están en los repositorios [46, 47]. A continuación se muestra una lista de las macros:

- **bmulclasses:** genera los histogramas de multiplicidad en BeBe y del parámetro de impacto requeridos para realizar la determinación de la centralidad mediante los dos enfoques abordados.
- **MCbmulclasses:** macro análoga a la anterior, pero considerando la simulación sin detector.
- **centralityclasses:** toma de entrada el archivo root generado por cualquiera de las macros anteriores. Como resultado obtiene los valores del parámetro de impacto para cada clase de centralidad y genera los histogramas con la clasificación de los eventos en distintas centralidades.

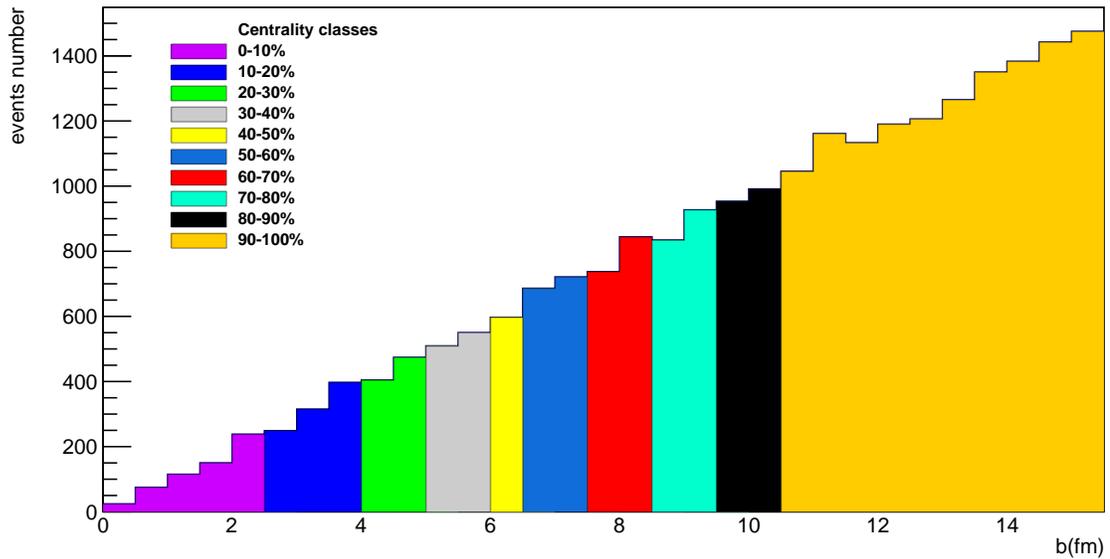


Fig. 37: Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe para colisiones $Bi + Bi$ a $11 GeV$.

- **multiplicityclasses:** toma de entrada el archivo root generado por cualquiera de las macros anteriores. Como resultado obtiene los valores de la multiplicidad para cada clase de centralidad y genera los histogramas con la clasificación de los eventos en distintas centralidades.
- **multiplicityfit:** toma de entrada el archivo root generado por cualquiera de las macros anteriores. Como resultado ajusta la distribución binomial negativa en conjunto con el Glauber a la distribución de multiplicidad.
- **mulb:** produce las gráficas de las correlaciones entre la multiplicidad y el parámetro de impacto. Resultado importante para determinar los anillos útiles de BeBe para determinar la centralidad con los enfoques abordados.

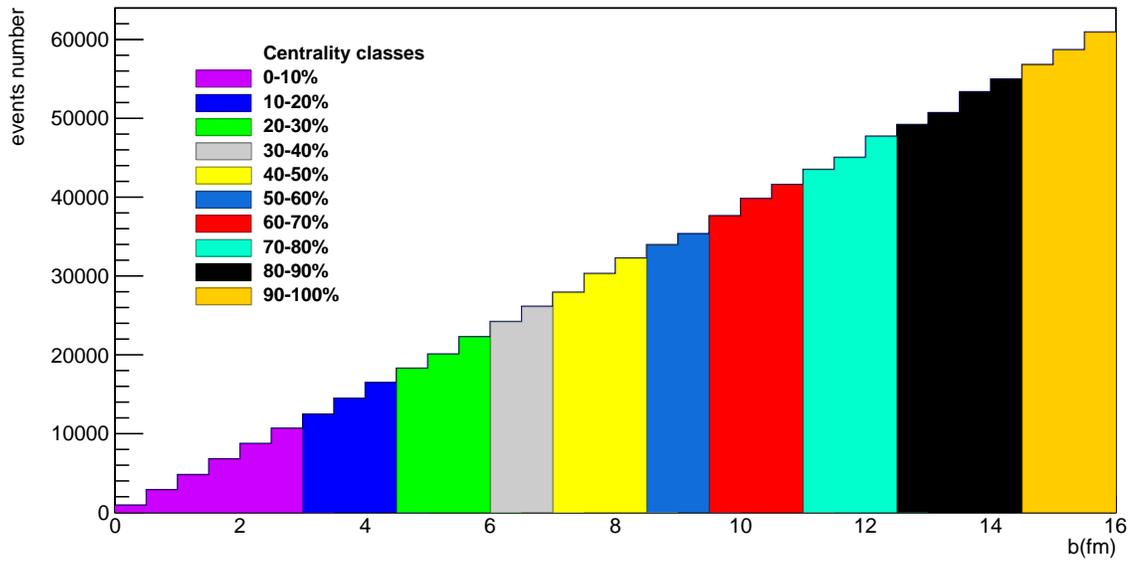


Fig. 38: Clases de centralidad usando la multiplicidad de todo el espacio fase para colisiones $Bi + Bi$ a $9 GeV$.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SM Sanches Jr, DA Fogaça y FS Navarra. «The time evolution of the quark gluon plasma in the early Universe». En: 630.1 (2015), pág. 012028 (vid. pág. 1).
- [3] M Rodríguez Cahuantzi y col. «MexNICA, Mexican group in the MPD-NICA experiment at JINR». En: 912.1 (2017), pág. 012016 (vid. págs. 1, 6).
- [4] RP Scharenberg, BK Srivastava y C Pajares. «Exploring the initial stage of high multiplicity proton-proton collisions by determining the initial temperature of the quark-gluon plasma». En: *Physical Review D* 100.11 (2019), pág. 114040 (vid. pág. 1).
- [6] M Colonna, V Baran, M Di Toro y C Rizzo. «Exploring the nuclear matter phase diagram with heavy ion reactions». En: 413.1 (2013), pág. 012018 (vid. pág. 3).
- [11] TA Drozhzhova, VN Kovalenko, A Yu Seryakov y GA Feofilov. «Centrality and multiparticle production in ultrarelativistic nuclear collisions». En: *Physics of Atomic Nuclei* 79.5 (2016), págs. 737-748 (vid. págs. 7, 37).
- [12] Valerica Baban, Alexandru Jipa, Oana Ristea y col. «Centrality determination in 15 GeV/u Au-Au collisions in CBM experiment». En: *Romanian Reports in Physics* 56.4 (2004), págs. 659-666 (vid. págs. 8, 12, 14).
- [13] ALICE Collaboration. «Centrality determination of Pb-Pb collisions at 2.76 TeV with ALICE». En: *CERN* (2014) (vid. págs. 8, 13, 15, 16, 18-20, 38, 73).
- [14] Sruthy Jyothi Das, Giuliano Giacalone, Pierre-Amaury Monard y Jean-Yves Ollitrault. «Relating centrality to impact parameter in nucleus-nucleus collisions». En: *Physical Review C* 97.1 (2018), pág. 014905 (vid. págs. 8, 12).
- [15] Igor Altsybeev y Vladimir Kovalenko. «Classifiers for centrality determination in proton-nucleus and nucleus-nucleus collisions». En: 137 (2017), pág. 11001 (vid. pág. 9).
- [18] A Fatkina, O Iakushkin, O Gasanova y L Tazieva. «Optimization of selected components in MPD Root: Capabilities of distributed programming techniques». En: (2016), págs. 213-217 (vid. pág. 10).
- [20] Richard S Hollis, BB Back, MD Baker y col. «Using multiplicity as a fractional cross-section estimation for centrality in PHOBOS». En: 5.1 (2005), pág. 46 (vid. págs. 13, 22).

- [21]Michael L Miller, Klaus Reygers, Stephen J Sanders y Peter Steinberg. «Glauber modeling in high-energy nuclear collisions». En: *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 57 (2007), págs. 205-243 (vid. págs. 14, 15, 67, 70).
- [22]JD Orjuela Koop, Phenix Collaboration y col. «Centrality categorization and application to physics effects in high-energy d+ A collisions». En: 535.1 (2014), pág. 012015 (vid. pág. 18).
- [23]Viktor Klochkov Oleksii Lubynets Ilya Selyuzhenkov. «Centrality estimation with MC Glauber model». En: (2018), pág. 10 (vid. págs. 20, 37).
- [24]A.N. Sisakian. *Multiparticle production*. JINR publishing department (vid. pág. 20).
- [25]Saini, Abhilasha and Bhardwaj, Sudhir. «The theoretical aspects of UrQMD & AMPT models». En: *J. Phys.* (2017) (vid. págs. 20, 21).
- [26]Marcus Bleicher, E Zabrodin, Christian Spieles y col. «Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model». En: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 25.9 (1999), pág. 1859 (vid. pág. 21).
- [27]Mauricio Alvarado, Alejandro Ayala, Marco Alberto Ayala-Torres y col. «A beam-beam monitoring detector for the MPD experiment at NICA». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 953 (2020), pág. 163150 (vid. págs. 23, 25).
- [28]Mauricio Alvarado, Alejandro Ayala, Marco Alberto Ayala-Torres y col. «Time resolution studies for scintillating plastics coupled to silicon photo-multipliers». En: *arXiv preprint arXiv:1901.04964* (2019) (vid. págs. 23, 59).
- [30]Ramón Acevedo Kado y col. «The conceptual design of the miniBeBe detector proposed for NICA-MPD». En: (jul. de 2020). arXiv: 2007 . 11790 [physics.ins-det] (vid. págs. 24, 59).
- [31]A Grigoryan, H Gulkanyan, V Papikyan y col. «Centrality dependence of particle production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV». En: *Physical Review C-Nuclear Physics* 91.6 (2015), págs. 064905-064905 (vid. pág. 36).
- [32]Dmitri Kharzeev y Marzia Nardi. «Hadron production in nuclear collisions at RHIC and high-density QCD». En: *Physics Letters B* 507.1-4 (2001), págs. 121-128 (vid. pág. 37).
- [36]B Alver, M Baker, C Loizides y P Steinberg. «The PHOBOS Glauber Monte Carlo». En: *arXiv preprint arXiv:0805.4411* (2008) (vid. págs. 67, 70).
- [37]Luis Valenzuela Cazares. «Simulaciones de colisiones de iones pesados relativistas para el experimento BMD en NICA-JINR. Tesis de licenciatura.» En: (2017) (vid. pág. 67).
- [40]Morris H DeGroot. *Probability and statistics*. 04; QA273, D4 1986. 1986 (vid. pág. 72).

- [41]A Mukhopadhyay, PL Jain y G Singh. «Multiplicity distributions in high-energy heavy-ion collisions». En: *Il Nuovo Cimento A (1965-1970)* 106.7 (1993), págs. 967-978 (vid. pág. 72).
- [42]Hao-jie Xu. «Understanding the negative binomial multiplicity fluctuations in relativistic heavy ion collisions». En: *arXiv preprint arXiv:1602.06378* (2016) (vid. pág. 73).
- [43]Paul G Hoel y col. «Introduction to mathematical statistics.» En: *Introduction to mathematical statistics*. 2nd Ed (1954) (vid. pág. 74).

PÁGINAS WEB

- [2]NICA. *Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA)*. 2019. URL: <http://nica.jinr.ru/physics.php> (visitado 1 de ene. de 2019) (vid. págs. 1, 3, 5).
- [5]Contemporary Physics Education Project (CPEP). *A Guide to the Nuclear Science Wall. Phases of Nuclear Matter*. 2019. URL: <https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/09/0.html> (visitado 1 de ene. de 2019) (vid. págs. 2, 3).
- [7]*Water Phase Diagram. ChemicalLogic*. 2020. URL: <http://www.chemicallogic.com/Pages/DownloadPhaseDiagrams.html> (visitado 1 de ene. de 2020) (vid. pág. 4).
- [8]NICA. *Multi-Purpose Detector (MPD)*. 2017. URL: <http://nica.jinr.ru/projects/mpd.php> (visitado 1 de ene. de 2019) (vid. pág. 5).
- [9]*Detectores modernos*. 2017. URL: http://www.particleadventure.org/spanish/modern_detects.html (visitado 1 de ene. de 2017) (vid. pág. 6).
- [10]*Typical detector components*. 2017. URL: http://www.particleadventure.org/component_detector.html (visitado 1 de ene. de 2017) (vid. pág. 7).
- [16]UrQMD collaboration. *Ultrarelativistic Quantum Molecular Dynamics (URQMD)*. 2019. URL: <https://urqmd.org> (visitado 1 de ene. de 2019) (vid. págs. 10, 21).
- [17]MPD y BMN software team. *How to install MpdRoot and BmnRoot*. 2019. URL: <http://mpd.jinr.ru/howto-install-mpdroot> (visitado 1 de ene. de 2019) (vid. págs. 10, 74).
- [19]MPD y BMN software team. *Simulation of the MPD experiment*. 2020. URL: <http://mpd.jinr.ru/simulation-of-the-mpd-experiment/> (visitado 1 de ene. de 2020) (vid. págs. 10, 74).
- [29]*LHC Trigger: Acercándonos al LHC*. 2020. URL: https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.lhc_trigger/idioma/es_ES (visitado 1 de ene. de 2020) (vid. pág. 24).

- [33] *Centrality Framework for NICA*. 2020. URL: <https://github.com/IlyaSegal/NICA/> (visitado 1 de ene. de 2020) (vid. pág. 37).
- [34] UrQMD collaboration. *UrQMD v3.4 Guide*. 2019. URL: <https://vfs.fias.science/seafhttp/files/e35c03d4-1647-4106-8e4f-90cadafcd5ef/urqmd-3.4.pdf> (visitado 1 de ene. de 2020) (vid. págs. 62, 66).
- [35] *Monte Carlo methods*. 2017. URL: <http://ihp-lx.ethz.ch/Stamet/lectureNotes/PDFs/ch4.pdf> (visitado 1 de ene. de 2017) (vid. pág. 64).
- [38] *Proyecto MC Glauber*. 2019. URL: <https://github.com/MCGlauber/MCG> (visitado 1 de ene. de 2019) (vid. págs. 68-70).
- [39] *TGlauberMC: A ROOT-based implementation of the PHOBOS Glauber Monte Carlo*. 2020. URL: <https://tglaubermc.hepforge.org/> (visitado 1 de ene. de 2020) (vid. pág. 70).
- [44] MPD y BMN software team. *MPDROOT Start Guide*. 2020. URL: <http://mpd.jinr.ru/mpdroot-start-guide/> (visitado 1 de ene. de 2020) (vid. pág. 74).
- [45] Luis Valenzuela-Cazares. *GitLab MexNICA Physics Analysis and Offline group*. 2020. URL: <https://gitlab.com/mexnica-physics-analysis-and-offline-group> (visitado 2 de mar. de 2020) (vid. págs. 74, 86).
- [46] Luis Valenzuela-Cazares y Pedro Gonzalez. *Bmdv1 repository*. 2020. URL: <https://git.jinr.ru/nica/mpdroot/tree/bmdv1/bmd> (visitado 2 de mar. de 2020) (vid. págs. 75, 86).
- [47] Luis Valenzuela-Cazares. *Mbbv1 repository*. 2020. URL: <https://git.jinr.ru/nica/mpdroot/-/tree/mbbv1> (visitado 2 de abr. de 2020) (vid. págs. 80, 86).
- [48] MPD y BMN software team. *MPDROOT macros*. 2020. URL: <http://mpd.jinr.ru/mpdroot-macros/> (visitado 1 de ene. de 2020) (vid. pág. 80).
- [49] Luis Valenzuela-Cazares. *Centrality Studies Macros and Files*. 2020. URL: <https://gitlab.com/luisval/masterthesis> (visitado 2 de mar. de 2020) (vid. pág. 84).

ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig. 1 Diagrama de fase en temperatura y presión del agua. Al incrementar la presión, la temperatura de ebullición del agua incrementa hasta alcanzar el punto crítico a una presión de 22.1 *MPa* (218 veces la presión atmosférica), y una temperatura de 374° *C*. En ese punto desaparece la coexistencia de fases, y la transición se hace continua o de segundo orden. Se nota que el hielo puede pasar a estado líquido con el aumento de presión. Este diagrama obtenido de la página web de ChemicalLogic [7]. 4
- Fig. 2 Bosquejo de diagrama de fases de la materia nuclear. Se muestran dos puntos críticos: de temperatura T_c y de densidad N_c , en los cuales ocurren las transiciones de fase entre los estados de materia nuclear hadrónica y el QGP. La línea curva entre los puntos críticos indica la región de transición de fase, donde la región de bajas temperaturas y densidades corresponde a la fase hadrónica y la región de altas temperaturas y densidades corresponde a la fase de QGP. 5

Fig. 3	Elementos básicos de los detectores actuales. Los detectores contemporáneos se conforman de un arreglo de detectores estructurados de acuerdo a las partículas de interés a capturar; de modo que cuando las partículas alcanzan al detector, dejan su firma en él mediante las interacciones que sufren o no en cada una de sus componentes. Las componentes básicas son la cámara de trayectoria, el calorímetro electromagnético (EM), el calorímetro hadrónico y la cámara de muones [9].	6
Fig. 4	Los calorímetros están diseñados para que las partículas a detectar depositen toda su energía en ellos, por lo cual se detienen por completo en el respectivo detector. Los diagramas indican que el material del que están hechos los calorímetros son tales que las partículas que entran sufren decaimientos [10].	7
Fig. 5	Colisión entre el núcleo proyectil y el núcleo objetivo con un parámetro de impacto b entre sí.	9
Fig. 6	Distribución de multiplicidad con la forma típica con las clases de centralidad indicadas. Presenta un pico en la región de multiplicidades cercanas a 0, que corresponde a los eventos de colisiones más periféricas (centralidad 100 %). Luego permanece aproximadamente constante para multiplicidades de 10 a 120 y finalmente decae drásticamente para los eventos de las colisiones más centrales (centralidad 0 – 10 %).	17
Fig. 7	En la figura izquierda se muestra la geometría propuesta para el detector BeBe. Cada detector se conforma de 162 celdas hexagonales de plástico centellador de 5 cm de altura, acomodadas en 6 anillos hexagonales. En la figura derecha se muestra al BeBe en uno de los lados de la cámara de proyección temporal.	25

Fig. 8	Distribución de pseudorapidez de las partículas cargadas capturadas por BeBe. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones <i>Au + Au minimum bias</i> a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.	26
Fig. 9	Distribución de pseudorapidez de partículas cargadas. Se señala el rango de cada uno de los detectores principales de MPD. BeBe complementará el rango de pseudorapidez de MPD. . . .	27
Fig. 10	Distribución espacial de partículas cargadas capturadas en el detector BeBe. Cada punto indica la posición de las partículas en el plano <i>X-Y</i> , donde el color indica el número de partículas en dicha ubicación. Se distingue que la intensidad es más alta en los anillos internos en comparación con el resto. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones <i>Au + Au minimum bias</i> a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.	28
Fig. 11	Distribución de partículas cargadas capturadas cada uno de los anillos de BeBe. Vista en el plano <i>X-Y</i> . En este trabajo, se indica como anillo 1 al más interno y como anillo 6 al más externo. Cada punto indica la posición de las partículas en el plano <i>X-Y</i> , donde el color indica el número de partículas en dicha ubicación. Se distingue que la intensidad es más alta en los anillos internos en comparación con el resto. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones <i>Au + Au minimum bias</i> a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.	29

Fig. 12	Distribución de multiplicidad de las partículas cargadas capturadas en todos los anillos de BeBe. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones <i>Au + Au minimum bias</i> a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT.	30
Fig. 13	Multiplicidad promedio de partículas cargadas capturadas por todos los anillos de BeBe vs el parámetro de impacto. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones <i>Au + Au minimum bias</i> a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT. . .	31
Fig. 14	Correlación de multiplicidad media de partículas cargadas capturadas en cada uno de los anillos de BeBe vs parámetro de impacto. En el primer anillo la multiplicidad incrementa conforme aumenta el parámetro de impacto. Lo anterior se debe a que dicho anillo captura más protones espectadores por estar más cerca del haz. La multiplicidad de los espectadores aumenta al incrementar el parámetro de impacto, pues el traslape de la colisión disminuye, resultando en la disminución del número de participantes y en el aumento del número de espectadores que continúan en dirección cercana al haz. En los anillos 3, 4, 5 y 6 la multiplicidad disminuye conforme aumenta el parámetro de impacto, por lo cual se sugiere emplear estos anillos para determinar la centralidad. Esta figura corresponde a 10,000 eventos de colisiones <i>Au + Au minimum bias</i> a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT. . .	33

Fig. 15 Representación gráfica de 1 evento $Au + Au$ en el cual se visualizan los protones, siendo en su mayoría espectadores y se encuentran en la región del primer anillo de BeBe. Evento generado con UrQMD y posteriormente transportado por el detector BeBe simulado en MPDROOT. 34

Fig. 16 Correlación de multiplicidad media vs parámetro de impacto. La multiplicidad disminuye conforme aumenta el parámetro de impacto. Considerando a la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT. 34

Fig. 17 Distribución de multiplicidad de las partículas cargadas capturadas por los anillos externos de BeBe. Esta distribución tiene un mejor comportamiento que la correspondiente a todos los anillos de BeBe. Sin embargo aún se presentan fluctuaciones debidas al bajo número de eventos. Corresponde a 10,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT. 35

Fig. 18 Distribución de multiplicidad de las partículas cargadas captu-
 radas por los anillos externos de BeBe. Esta distribución tiene
 la forma esperada, hay un pico correspondiente a las colisiones
 más periféricas en la región de multiplicidades de 0 a 5. Entre
 multiplicidades de 10 y 45 permanece aproximadamente constan-
 te y decae conforme las colisiones son más centrales, de
 multiplicidad de 45 en adelante. Una vez obtenida esta distri-
 bución, es posible determinar las clases de centralidad y hacer
 un ajuste con la distribución binomial negativa y el modelo
 Glauber. 39

Fig. 19 Distribución de multiplicidad de las partículas cargadas en la
 región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe.
 Simulación sin detector. Esta distribución tiene la forma espe-
 rada, hay un pico correspondiente a las colisiones más peri-
 féricas para multiplicidades de 0 a 10. Entre multiplicidades
 de 10 y 120 permanece aproximadamente constante y decae
 abruptamente en la región de multiplicidades más altas, co-
 rrespondiente a los eventos de las colisiones más centrales. . . 40

Fig. 20 Distribuciones del parámetro de impacto de 1,000,000 eventos de colisiones $Au + Au$ *minimum bias* a $\sqrt{S_{NN}} = 11 \text{ GeV}$ generados en UrQMD y posteriormente transportados por el detector BeBe simulado en MPDROOT. Número de eventos por bins de parámetro de impacto (figura superior) y número de partículas por bins de parámetro de impacto (figura inferior). Al nivel de la simulación se conoce el parámetro de impacto del evento en el cual fue producida cada una de las partículas detectadas por BeBe. De este modo, se construye un histograma donde el número de entradas por bins de b representa el número de partículas que se generaron en los eventos con dicho parámetro de impacto. Así, la integral total del histograma corresponde a la multiplicidad de todos los eventos de las colisiones. Puesto que cada clase de centralidad representa una fracción de la multiplicidad total, es posible conocer el número de partículas para cada clase de centralidad. Para cada clase se integra en intervalos de b hasta que la integral corresponde a la fracción de la multiplicidad de dicha clase. De este modo, se estimaron los valores de b para cada clase de centralidad. . . . 41

Fig. 21 Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Se empleó la definición de clases de centralidad en términos de la multiplicidad para estimar los valores de b para cada clase. 46

Fig. 22	Clases de centralidad usando la multiplicidad en la región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. Simulación sin detector. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Se empleó la definición de clases de centralidad en términos de la multiplicidad para estimar los valores de b para cada clase.	47
Fig. 23	Distribuciones de multiplicidad. Número de eventos por bins de multiplicidad (figura superior) y número de partículas por bins de multiplicidad (figura inferior).	48
Fig. 24	Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe.	50
Fig. 25	Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos de la región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. Simulación sin detector.	51
Fig. 26	Número de nucleones participantes N_{par} (histograma superior) y número de colisiones N_{col} (histograma inferior). Simulación de 100,000 eventos $Au + Au$ <i>minimum bias</i> a $\sqrt{S_{NN}} = 11$ GeV con el código TGLauberMC, una implementación en ROOT del modelo Glauber. Los valores medios de estas distribuciones ($N_{par} = 97.18$ y $N_{col} = 183.4$) son usados como datos de entrada al momento de hacer el ajuste a la distribución de multiplicidad con la distribución binomial negativa en conjunto con el modelo Glauber.	53
Fig. 27	Ajuste a la distribución de multiplicidad medida en los anillos externos del detector BeBe. Ajuste mediante la distribución binomial negativa y el modelo Glauber. Los valores de multiplicidad están asociados a un cierto número de antecesores, cuya probabilidad es descrita por la NBD. Los valores de los parámetros obtenidos son $\mu = 14$, $k = 0.56$ y $f = 2.11$	54

Fig. 28	<p>Ajuste a la distribución de multiplicidad medida en los anillos externos del detector BeBe, con un corte para omitir a eventos de multiplicidades superiores a 45. Ajuste mediante la distribución binomial negativa y el modelo Glauber. Los valores de multiplicidad están asociados a un cierto número de antecesores, cuya probabilidad es descrita por la NBD. Los valores de los parámetros obtenidos son $\mu = 13, k = 2.11$ y $f = 0.39$.</p>	55
Fig. 29	<p>Ajuste a la distribución de multiplicidad correspondiente a la simulación sin detector, en la región de pseudorapidez de los anillos externos de BeBe. Ajuste mediante la distribución binomial negativa y el modelo Glauber. Los valores de multiplicidad están asociados a un cierto número de antecesores, cuya probabilidad es descrita por la NBD. Los valores de los parámetros obtenidos son $\mu = 23, k = 0.35$ y $f = 2.11$.</p>	56
Fig. 30	<p>Ajuste a la distribución de multiplicidad correspondiente a la simulación sin detector, en la región de pseudorapidez de los anillos externos de BeBe. Con un corte para omitir a eventos de multiplicidades superiores a 120. Ajuste mediante la distribución binomial negativa y el modelo Glauber. Los valores de multiplicidad están asociados a un cierto número de antecesores, cuya probabilidad es descrita por la NBD. Los valores de los parámetros obtenidos son $\mu = 40, k = 0.39$ y $f = 2.11$.</p>	57
Fig. 31	<p>Esquema de pseudorapidez. Donde el haz está en la dirección $\theta = 0$ o $\eta = \infty$.</p>	63
Fig. 32	<p>Distribución de densidad de carga nuclear de Au según la función de Fermi. La región difusa del Au termina ligeramente por debajo de los 11 fm. Esta gráfica fue generada a partir del Código de Python del proyecto MCGLauber [38].</p>	68

Fig. 33	<p>Colisiones $Au + Au$ a $4 GeV$ (izquierda) y a $11 GeV$ (centro y derecha). Las figuras de la izquierda y la del centro corresponden a colisiones centrales. La figura de la derecha corresponde a una colisión periférica. Los puntos rojos y amarillos son los participantes y los puntos azules y verdes son los espectadores. El traslape entre los núcleos es mayor en la colisión central de $11 GeV$ que en la colisión central de $4 GeV$, si el traslape es mayor hay más participantes y menos espectadores, y se espera una mayor multiplicidad. Por otra parte, el traslape entre los núcleos es mayor en la colisión central de $11 GeV$ que la colisión periférica de $11 GeV$, por lo cual el número de participantes es mayor para la colisión central, y se espera una mayor multiplicidad. Estas gráficas fueron generadas mediante el modelo Glauber en el programa de Python MCGlauber[38].</p>	70
Fig. 34	Clases de centralidad usando la multiplicidad de todos los anillos de BeBe para colisiones $Au + Au$ a $11 GeV$	82
Fig. 35	Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. Considerando un corte en los eventos de multiplicidades superiores a 45, correspondientes a las colisiones de tipo centrales, para las cuales la multiplicidad es baja. . . .	84
Fig. 36	Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe. Considerando un corte para los eventos de multiplicidad superior a 45, correspondientes a las colisiones más centrales.	86
Fig. 37	Clases de centralidad usando la multiplicidad de los anillos 3, 4, 5 y 6 de BeBe para colisiones $Bi + Bi$ a $11 GeV$	87
Fig. 38	Clases de centralidad usando la multiplicidad de todo el espacio fase para colisiones $Bi + Bi$ a $9 GeV$	88

ÍNDICE DE CUADROS

Tab. 1	Aproximación de regiones de pseudorapidez de cada uno de los anillos de BeBe. Cubren una región aproximada de $2.0 < \eta < 4.2$. Considerando que el detector se localiza a $\pm 2 m$ a lo largo de la dirección del haz.	26
Tab. 2	Clases de centralidad, considerando la multiplicidad de los anillos externos (3, 4, 5, y 6) de BeBe. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Se empleó la definición de clases de centralidad en términos de la multiplicidad para estimar los valores de b para cada clase. Los valores medios de N_{par} y N_{col} se obtuvieron al simular con el modelo Glauber un ensemble de eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 GeV$ con rango de parámetro de impacto correspondiente a cada clase de centralidad.	44
Tab. 3	Clases de centralidad, considerando la multiplicidad correspondiente a la región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5, y 6. Simulación sin detector. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Los valores medios de N_{par} y N_{col} se obtuvieron al simular con el modelo Glauber un ensemble de eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 GeV$ con rango de parámetro de impacto correspondiente a cada clase de centralidad.	44

Tab. 4	Clases de centralidad, considerando la multiplicidad de todo el espacio fase. Simulación sin detector. El parámetro de impacto se obtuvo del generador UrQMD. Los valores medios de N_{par} y N_{col} se obtuvieron al simular con el modelo Glauber un ensemble de eventos de colisiones $Au + Au$ a $\sqrt{S_{NN}} = 11 GeV$ con rango de parámetro de impacto correspondiente a cada clase de centralidad.	45
Tab. 5	Clases de centralidad. Comparación de simulación con detector (izquierda) y sin detector (derecha). Ambos casos corresponden a una simulación de 1,000,000 eventos de colisiones $Au + Au$ <i>minimum bias</i> a $\sqrt{S_{NN}} = 11 GeV$ generados en UrQMD. Para el caso en el cual se consideró la simulación del detector se empleó MPDROOT para simular a BeBe. La diferencia es entre 0,2% y 2%, lo cual indica que para este análisis en particular no resulta crucial la selectividad de las partículas detectadas.	45
Tab. 6	Clases de centralidad y multiplicidad, considerando la multiplicidad de los anillos externos (3, 4, 5, y 6) de BeBe. Cada clase de centralidad tiene asociado un rango de valores del parámetro de impacto y de la multiplicidad.	49
Tab. 7	Clases de centralidad y multiplicidad, considerando la multiplicidad correspondiente a la región de pseudorapidez de los anillos 3, 4, 5, y 6. Simulación sin detector. Cada clase de centralidad tiene asociado un rango de valores del parámetro de impacto y de la multiplicidad.	49
Tab. 8	Clases de centralidad de eventos de colisiones $Au + Au$, considerando todos los anillos de BeBe.	83

Tab. 9	Clases de centralidad obtenidas mediante la multiplicidad de los anillos externos (3, 4, 5, y 6) de BeBe. Considerando un corte para los eventos de multiplicidad superior a 45, correspondientes a las colisiones más centrales.	83
Tab. 10	Clases de centralidad de eventos $Bi + Bi$ a 11 GeV , considerando anillos externos (3, 4, 5, y 6) de BeBe.	85
Tab. 11	Clases de centralidad usando la multiplicidad de todo el espacio fase para colisiones $Bi + Bi$ a 9 GeV	85

DECLARACIÓN

Declaro que he completado mi trabajo de tesis con la ayuda de las referencias que he mencionado en dicho trabajo.

Hermosillo, Sonora, Mayo 2020

Luis Valenzuela Cázares

Luis Valenzuela Cázares

