

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

На правах рукописи

ЯКОБНЮК ЛЕОНИД АЛЕКСЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ  
СПЕКТРАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ  
СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕР АДРОННЫМ КАЛОРИМЕТРОМ  
НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA**

Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»  
Диссертация на соискание степени магистра

Студент \_\_\_\_\_ Л. А. Якобнюк

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Е. Ю. Солдатов

Научный консультант,  
д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ А. Б. Курепин

Москва 2025

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ  
СПЕКТАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ  
СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕР АДРОННЫМ КАЛОРИМЕТРОМ  
НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA**

Студент

\_\_\_\_\_ Л. А. Якобнюк

Научный руководитель,

к.ф.-м.н.,

\_\_\_\_\_ Е. Ю. Солдатов

Научный консультант,

д.ф.-м.н.,

\_\_\_\_\_ А. Б. Курепин

Рецензент,

\_\_\_\_\_ И. О. Фамилия

Секретарь ГЭК,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,

д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ М. Д. Скорохватов

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение</b>                                                                            | <b>3</b>  |
| <b>1 Описание установки и методы определения центральности</b>                             | <b>4</b>  |
| 1.1 Методы определения центральности при ядро-ядерных столкновениях . . . . .              | 4         |
| 1.1.1 Определение центральности по энергии множественности образовавшихся частиц . . . . . | 5         |
| 1.1.2 Определение центральности по полной поперечной энергии $E_T$ . . . . .               | 6         |
| 1.1.3 Определение центральности по энергии, унесенной спектаторами . . . . .               | 6         |
| 1.2 Схема установки эксперимента MPD . . . . .                                             | 6         |
| <b>2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА</b>                         | <b>9</b>  |
| 2.1 Применение теоремы Байеса для определения разрешения адронного калориметра . . . . .   | 10        |
| <b>3 ПРЕДЛОЖЕНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА</b>                                      | <b>13</b> |
| <b>Список литературы</b>                                                                   | <b>17</b> |

# ВВЕДЕНИЕ

Центральность является ключевым параметром для определения размера системы столкновений при столкновениях релятивистских тяжелых ионов. Для некоторых диапазонов энергий на коллайдерах RHIC и LHC получены хорошие результаты, однако при энергиях  $2,5 - 5,5$  ГэВ/нуклон на коллайдере NICA из-за недостаточного собственного разрешения по выделенной энергии калориметра необходимо провести более подробный анализ.

Принцип эксперимента MPD (Multi-Purpose Detector) заключается в измерении большого числа наблюдаемых параметров столкновений тяжелых ионов в зависимости от энергии столкновения и центральности системы [1, 2]. Классификация событий по центральности в ядро-ядерных столкновениях — одна из самых главных задач в экспериментах по исследованию свойств нагретой адронной материи, потому что это позволяет изучать такие наблюдаемые величины, как коллективный поток, множественность частиц и флуктуации, которые сильно зависят от центральности. Поэтому необходимо не просто разделять события на центральные и периферические, а рассматривать различные диапазоны по центральности столкновения.

Например, для объяснения эффекта гашения струй [3], вводится фактор ядерной модификации, то есть коррекция эквивалентного числа протон-протонных столкновений, которое зависит от центральности.

# 1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ

MPD — один из двух основных экспериментов на базе коллайдера NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). Его основная задача — исследование фазовой диаграммы КХД (квантовая хромодинамика), используя тяжелые сталкивающиеся ядра с  $4 \text{ ГэВ} \leq \sqrt{s_{NN}} \leq 11 \text{ ГэВ}$ .

Эксперимент MPD позволяет регистрировать частицы с углом, близким к  $4\pi$ , и предназначен для обнаружения заряженных адронов, электронов и фотонов, образующихся при столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий и высоких светимостей коллайдера NICA.

В этой главе будет рассмотрена схема установки эксперимента MPD, схема и принцип работы переднего адронного калориметра FHCAL и различные методы определения центральности.

## 1.1 МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ ПРИ ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Для понимания, что такое центральность столкновения, можно воспользоваться простой геометрической картиной, показанной на рисунке 1.1. Сама центральность определяется модулем вектора  $\mathbf{b}$ , который называют прицельным параметром. Этот вектор соединяет центры сталкивающихся ядер и лежит в плоскости, перпендикулярной оси столкновения. Принято классифицировать события по центраальности, указывая диапазон прицельных параметров, либо долей от полного геометрического сечения.

Здесь можно выделить три переменные, которые можно рассчитать по различным моделям, например модели Глаубера [4] :  $N_{part}$  — число нуклонов, участвующих в столкновении;  $N_s$  — число нуклонов-спектаторов

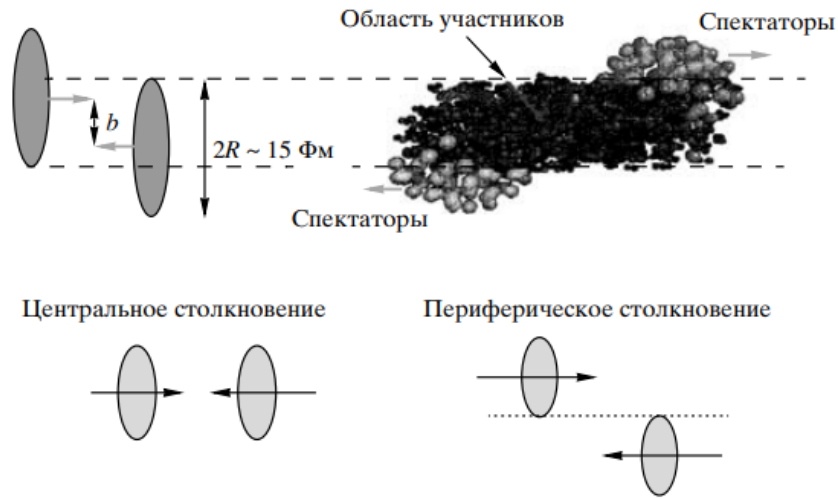


Рисунок 1.1 — Геометрическая картина столкновения ядер с прицельным параметром  $b$

(т.е. нуклонов, не столкнувшихся ни с одним другим нуклоном);  $N_{coll}$  — число бинарных нуклон–нуклонных столкновений. Первый и третий из этих параметров невозможно измерить на эксперименте.

### 1.1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ ПО ЭНЕРГИИ МНОЖЕСТВЕННОСТИ ОБРАЗОВАВШИХСЯ ЧАСТИЦ

Детекторами фиксируется множественность образовавшихся частиц в зоне перекрытия ядер. Чем больше множественность, тем центральнее столкновение. Этот метод используется в эксперименте STAR [5].

Как преимущества использования этого метода можно выделить его простоту ( достаточно детекторов, регистрирующих заряженные частицы), высокую статистику, т.к. заряженные частицы, такие как протоны, электроны,  $\pi$ - и  $K$ -мезоны рождаются в высоком количестве, широкий энергетический диапазон, возможность использования в разных столкновительных системах (  $Au + Au$ ,  $Pb + Pb$ ,  $p + Pb$  ).

Его недостатки: в очень центральных столкновениях рост множественности начинает замедляться; в сильно периферических столкновениях флуктуации становятся значимыми из-за недостатка статистики; чувствительность метода только к заряженным частицам; чувствительность к фоновым процессам, например к распадам резонансов.

### **1.1.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ ПО ПОЛНОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ $E_T$**

До столкновения ядер полная поперечная энергия равна нулю, поэтому удобно измерять эту энергию после столкновения и по ней определять центральность. Этот метод применялся на эксперименте WA-98 [6].

Этот метод учитывает и нейтральные частицы, в отличие от предыдущего, меньше зависит от эффективности регистрации, устойчив к фоновым процессам, позволяет разделять даже самые центральные события. В свою очередь, для работы этого метода необходимы калориметры с высоким энергетическим разрешением. Также, при периферических столкновениях велика роль флуктуаций из-за малых  $E_T$

### **1.1.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ ПО ЭНЕРГИИ, УНЕСЕННОЙ СПЕКТАТОРАМИ**

Суть этого метода заключается в определении центральности по энергии, унесённой спектаторами, которую определяет адронный калориметр, расположенный под «нулевым» углом, т.е. практически перпендикулярно пучку. Этот метод используется на многих экспериментах [7, 8], в том числе и на MPD, где для этих целей установлен FHCAL.

Этот метод позволяет отделять периферические события, эффективен для асимметричных систем, менее чувствителен к наложению нескольких столкновений в одном пролёте пучка. При этом он крайне плох в самых центральных столкновениях из-за малости сигнала и не может показать, что происходит в области взаимодействия. Поэтому обычно этот метод применяется в комбинации с одним из двух предыдущих.

## **1.2 СХЕМА УСТАНОВКИ ЭКСПЕРИМЕНТА MPD**

На рисунке 1.2 показан вид сбоку эксперимента MPD. Обозначены детекторы установки: ТРС (время–проекционная камера) вместе с TOF (время пролётный детектор) будут использоваться для определения импульса и типа частицы; электромагнитные калориметры, которые необходимы для

измерения параметров электронов и фотонов; передний адронный калориметр (FHCAL) и др.

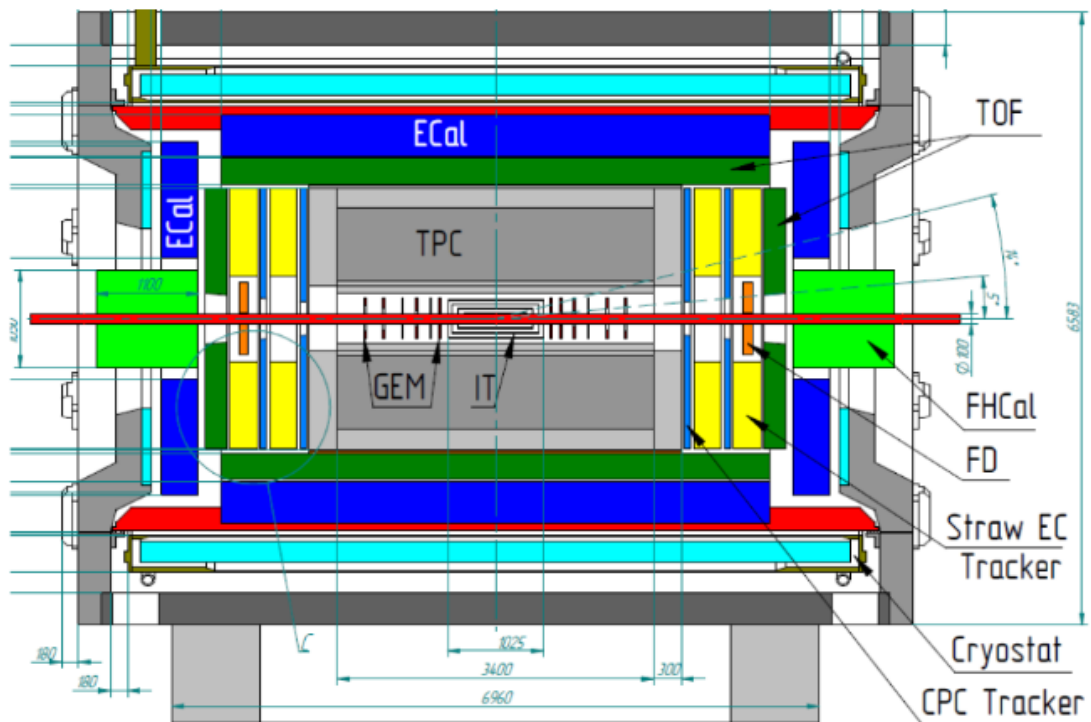


Рисунок 1.2 — Схема установки эксперимента MPD

Рассмотрим более подробно FHCAL, отклик которого и будет моделироваться далее в работе. Модульная конструкция калориметра представлена на рисунке 1.3. Этот детектор является доработанной версией ZDC (Zero – Degree Calorimeter), которую ранее планировалось использовать на эксперименте MPD [9]. FHCAL предназначен для измерения центральности столкновений частиц. Он состоит из двух идентичных детекторов, каждый из которых состоит из 44 сцинтилляционных плоскостей размером  $15 \times 15$  см<sup>2</sup>, расположенных примерно через 3 метра от точки столкновения пучков. Отверстие в центре предназначено для пучка. Такая геометрия была выбрана для учёта движения нуклонов внутри ядра, а также для того, чтобы ядерные фрагменты, в которые может связаться часть нуклонов-спектаторов, тоже попадали в калориметр. Сигнал от спектаторов пропорционален их числу, что позволяет отделить спектр спектаторов от спектра пионов. Каждый модуль состоит из 42 слоев свинца и сцинтиллятора в соотношении 4:1 (16 мм свинца и 4 сцинтиллятора). Общая длина модуля составляет чуть менее метра, что позволяет калориметру полностью



поглотить энергию налетающих адронов.

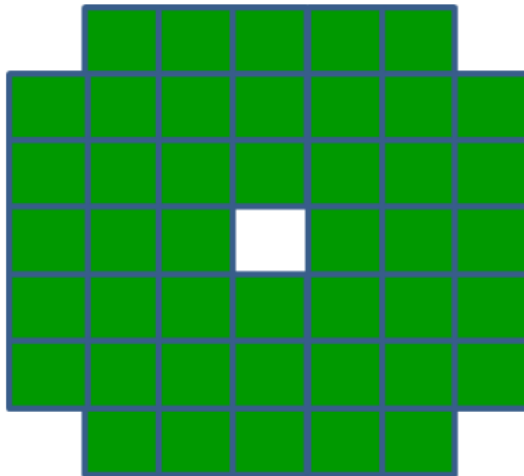


Рисунок 1.3 — Модульная структура одного из передних адронных калориметров перпендикулярно пучку

Данный калориметр способен регистрировать частицы с псевдобыстротой от 2.5 до 4.5 и любым азимутальным углом.

## 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА

Предполагается, что каждой выделенной в калориметре энергии соответствует какой то среднее число спектаторов, которое подчиняется распределению Пуассона при малом их числе и распределению Гаусса при большом. Используя фрагментационные модели DCM-QGSM [10] и UrQMD [11], было получено, что величина выделенной энергии (а, значит, и число спектаторов) прямо пропорциональна прицельному параметру при малых значениях центральности. Далее это распределение нарушается из-за наличия отверстия для пучка, так как часть спектаторов связываются в ядерные фрагменты, которые улетают в отверстие подобно основному пучку и не попадают в калориметр. Эта проблема была рассмотрена в работе [12]

По результатам калибровки [2] получено, что энергетическое разрешение калориметра по энергии спектатора оказывается невысоким. Оно подчиняется распределению Гаусса:

$$\sigma = 0.56 * \sqrt{E_{beam}} \quad (2.1)$$

где  $E_{beam}$  - энергия пучка на нуклон в ГэВ.

Распределение энергии в калориметре складывается из независимых вкладов от каждого спектатора. По теореме о дисперсии суммы получается, что относительная ошибка в определении выделенной в калориметре энергии  $E_s$  пропорциональна  $1/\sqrt{N_s}$ , что позволяет получать разрешение на уровне нескольких процентов.

Однако для применения этого метода необходимо получить однозначное соответствие между энергией, выделенной в калориметре, и числом спектаторов, которое эту энергию выделило. Энергетический спектр калориметра оказывается плавной кривой [2], то есть его невозможно разбить

на отдельные пики и сопоставить каждой энергии свое число спектаторов. Значит каждой энергии  $E_s$  может соответствовать диапазон значений  $N_s$ .

Получается, что необходимо решить обратную задачу: найти число спектаторов при какой-то фиксированной энергии  $E_s$ . Зная ширину этого распределения, можно получить искомый диапазон значений  $N_s$ . Для этого воспользуемся теоремой Байеса.

## 2.1 ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРЕМЫ БАЙЕСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА

Из калибровки известна плотность распределения энергии, выделенной каждым спектатором 2.1. Плотность распределения суммы вкладов отдельных спектаторов в известное из эксперимента значение выделенной энергии в адронном калориметре по теореме о вероятности суммы определяется следующим распределением Гаусса:

$$P_{E_s}(N_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N_s \sigma^2}} \exp\left(-\frac{(E_s - N_s E_{beam})^2}{2N_s \sigma^2}\right) \quad (2.2)$$

В дальнейших оценках будем пренебрегать отличием величины выделенной энергии от суммарной энергии  $N$  спектаторов. Вероятность выхода  $P(N)$  числа  $N_s$  спектаторов при небольших значениях  $N_s$  можно определить по распределению Пуассона. При реальных измерениях с калориметром значения  $N$  составляют несколько десятков. В этом случае возможен предельный переход к распределению Гаусса с величиной дисперсии, равной математическому ожиданию  $N$ . Полная вероятность регистрации энергии  $E_s$  в калориметре равна

$$P(E_s) = \sum_{N_{min}}^{N_{max}} P_{E_s}(N_s) P(N_s) \quad (2.3)$$

Тогда вероятность зарегистрировать  $N_s$  спектаторов при условии регистрации калориметром энергии  $E_s$ :

$$P_{N_s}(E_s) = \frac{P_{E_s}(N_s)P(N_s)}{P(E_s)} = \frac{1}{P(E_s)} \frac{1}{\sigma \cdot 2\pi N_s} \exp\left(-\frac{(E_s - N_s E_b)^2}{2\sigma^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(\bar{N}_s - N_s)^2}{2N_s}\right) \quad (2.4)$$

Результат для столкновений ядер  $^{209}\text{Bi}$  при фиксированной энергии  $E_s = 400$  ГэВ представлен на рисунке 2.2

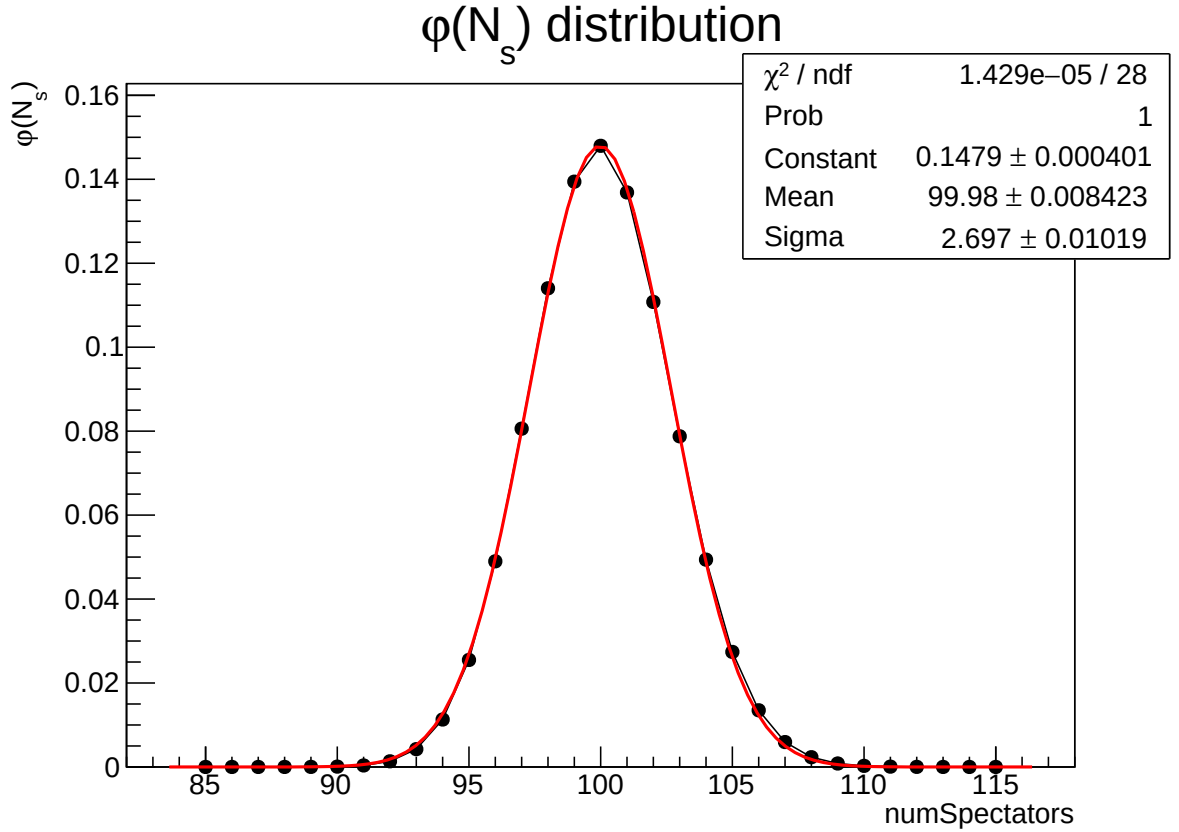


Рисунок 2.1 — Вероятность выхода  $N_s$  спектаторов при столкновении ядер висмута с  $\sqrt{s_{NN}} = 8$  ГэВ при регистрации энергии 400 ГэВ адронным калориметром

Полученные результаты для разных зафиксированных энерговывделений калориметра представлены в таблице 2.1.

|                   |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $E_s^{fix}$ , ГэВ | 20  | 60  | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 |
| $\sigma_{N_s}$    | 0,6 | 1,1 | 1,3 | 1,9 | 2,7 | 3,3 | 3,8 |

Таблица 2.1 — Результаты расчёта ширины распределений числа спектаторов  $N_s$  при различной фиксированной энергии

В некотором приближении предположим, что для разделения пиков

на энергетическом спектре калориметра необходимо взять диапазон спектров в  $[\bar{N}_s - 2 \cdot \sigma_{N_s}; \bar{N}_s + 2 \cdot \sigma_{N_s}]$

Таким образом, величина дисперсии распределения энергии калориметра  $D_{E_s}$  определяется величиной дисперсии распределения 2.4 как:

$$D_{E_s} = 16E_{beam}^2 \cdot D_{N_s}(E_s) \quad (2.5)$$

Будем полагать, что 100% центральности соответствует 200 спектров ( пренебрежём тем, что в ядре висмута 209 нуклонов, а не 200 ). Можно получить относительную ошибку, используя результаты формулы 2.5

$$\delta = \sqrt{D_{E_s}}/E_s \quad (2.6)$$

В результате можно выяснить, на какие диапазоны разбиваются данные калориметра для определения центральности.

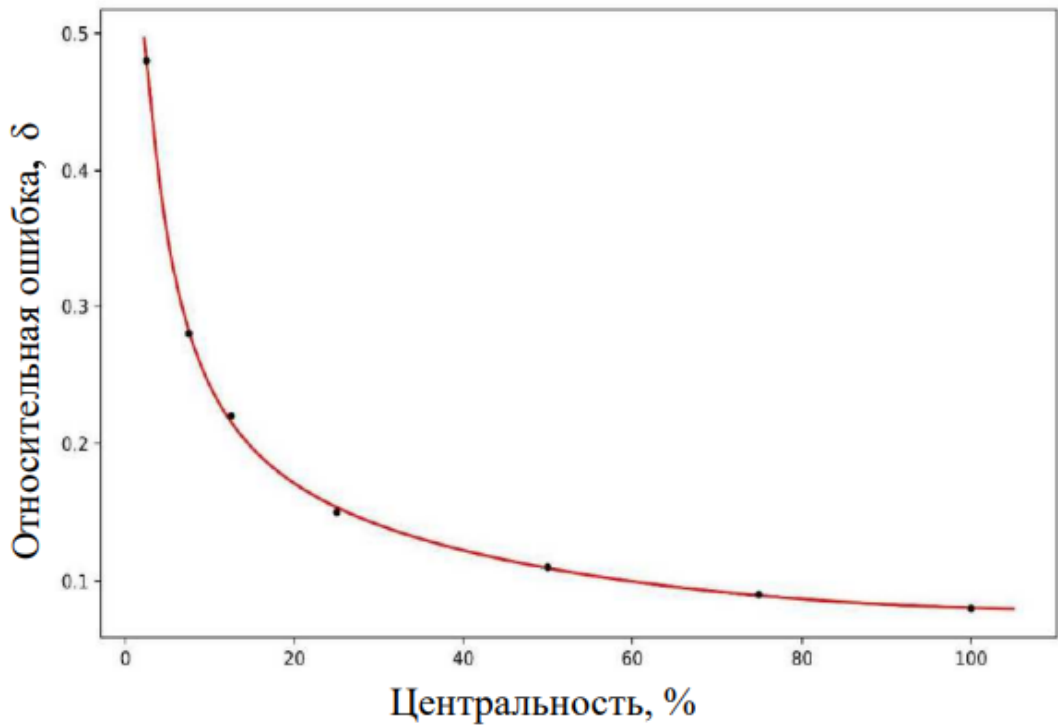


Рисунок 2.2 — Относительная ошибка при определении центральности столкновения ядер висмута с  $\sqrt{s_{NN}} = 8$  ГэВ адронным калориметром установки MPD коллайдера NICA

### 3 ПРЕДЛОЖЕНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА

Из-за наличия отверстия для прохождения пучков появляется неоднозначность в определении зависимости числа зрителей от центральности из-за образования значительного числа легких фрагментов при периферических столкновениях, которые проходят через отверстие для пучков и не регистрируются.

Один из возможных способов решения этой проблемы заключается в измерении пространственного распределения зрителей [13]. Но этот метод тяжело применять в данной ситуации, потому что при энергиях NICA не достигается удовлетворительное для его применения разрешение по энергии.

Второй и более надёжный способ определения центральности по данным калориметра — размещение его модулей после отклоняющих дипольных магнитов которые служат для разведения встречных пучков коллайдера. Подобное размещение выполнено для всех детекторов ZDC в ЦЕРНе. После столкновения в точке встречи каждый из пучков продолжает движение по некоторой центральной траектории. По той же траектории, что и пучки, летят различные частицы, образованные в результате столкновения, в том числе и интересующие нас нуклоны-зрители, образованные при взаимодействии ядер висмута. На траектории пучков коллайдера после прохождения установки MPD расположены два магнита MB1 и MB2, разводящие пучки по вертикали, с магнитным полем, различным при разных энергиях пучка, и длиной поля  $L_1 = 1,38$  м. Оценки величины отклонения пучка и частиц сделаны для величины кинетической энергии ядер висмута 4 ГэВ на нуклон и магнитного поля  $B = 1.197$  Тл. Импульс протона — зрителя  $p = 4$  ГэВ.

Отклонение заряженных частиц при пролёте через магнитное поле

можно оценить по формуле 3.1

$$h = R \cdot (1 - \cos(\alpha)) = R \cdot \frac{\alpha^2}{2} = \frac{L_1^2}{2R} = \frac{qBL_1^2}{2p} \quad (3.1)$$

где  $R$ - радиус кривизны траектории,  $\alpha$ - малый угол, на который ядро или протон отклоняется от первоначальной траектории,  $q$ - заряд.

Значит, при прохождении магнита MB1 один из пучков ядер висмута отклоняется на  $h_{Bi} = 3,5$  см в направлении вниз 3.1. Отклонение протона-спектатора в том же направлении составляет  $h_{spec} = 7.1$  см. Тяжелые фрагменты с отношением массы к заряду, близким к ядрам висмута, отклоняются вместе с основным пучком. Расстояние между основным пучком и протоном-спектатором составляет 3,5 см.

Но не все протоны-спектаторы влетают в магнитное поле полностью в продольном направлении. Часть из них имеет поперечный импульс, а значит влетает под небольшим углом  $\theta$ ,  $\sin(\theta) \approx 0,03$ . Это приводит к размытию «пятна» протонов на приблизительно 4,1 см в направлениях вверх и вниз, в соответствии с 3.2

$$d = L_1 \cdot \tan(\theta) \approx L_1 \cdot \theta \quad (3.2)$$

После магнитного поля спектаторы и ядра висмута летят еще 2,5 метра до детектора FHCa1, что приводит к дополнительному отклонению от первоначальной траектории ядер до 16,1 см, а «пятно» протонов становится размыто в диапазоне  $33 \pm 41$  см, что позволяет установить модули калориметра с квадратным сечением 15 x 15 кв. см в количестве от 12 до 16 шт на расстоянии несколько сантиметров от основного пучка вплотную к вакуумной трубке.

При таком расположении модулей адронного калориметра обеспечивается плавное увеличение выделенной в калориметре энергии и соответственно увеличение числа спектаторов-протонов и легких фрагментов вплоть до центральных, эквивалентных параметру столкновения 12 Фм. Однако при образовании тяжелых фрагментов при ультра периферическом столкновении, уходящих вместе с основным пучком, возможен выход небольшого числа протонов-спектаторов, дающих сигнал в калориметре, аналогичный центральному столкновению. Для того, чтобы избежать иска-

жение спектра адронного калориметра, необходимо установить несколько модулей электромагнитного калориметра, ECal, изготовленных для установки MPD, на небольшом расстоянии от точки встречи. Они будут давать триггерный сигнал для считывания информации адронного калориметра.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Alexander Ivashkin, Dmitry Finogeev, Marina Golubeva, Fedor Guber, Alexander Izvestnyy, Sergey Morozov, and Alexander Strizhak. Determination of geometry of heavy ion collisions with forward hadron calorimeter (FHCAL) at MPD/NICA. *EPJ Web Conf.*, 204:07002, 2019.
- [2] MPD Collaboration: Abgaryan V. et al. Status and initial physics performance studies of the mpd experiment at NICA. *The European Physical Journal A*, 58(7), July 2022.
- [3] C. Adler et al. Disappearance of back-to-back high- $p_t$  Hadron Correlations in Central Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Physical Review Letters*, 90(8), February 2003.
- [4] Michael L. Miller, Klaus Reygers, Stephen J. Sanders, and Peter Steinberg. Glauber modeling in high-energy nuclear collisions. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 57(1):205–243, November 2007.
- [5] B. Abelev. Growth of long range forward-backward multiplicity correlations with centrality in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Physical Review Letters*, 103(17), October 2009.
- [6] M. M. Aggarwal et al. Centrality dependence of neutral pion production in 158-A GeV Pb + Pb Collisions. *Physical Review Letters*, 81(19):4087–4091, November 1998.
- [7] S. Afanasiev et al. Systematic studies of elliptic flow measurements in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Physical Review C*, 80(2), August 2009.
- [8] C. Blume and the NA49 Collaboration. Centrality and energy dependence

of proton, light fragment and hyperon production. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 34(8):S951–S954, July 2007.

- [9] M. B. Golubeva, F. F. Guber, A. P. Ivashkin, A. Yu. Isupov, A. B. Kurepin, A. G. Litvinenko, E. I. Litvinenko, I. I. Migulina, and V. F. Peresedov. Nuclear-nuclear collision centrality determination by the spectators calorimeter for the MPD setup at the NICA facility. *Physics of Atomic Nuclei*, 76(1):1–15, January 2013.
- [10] M. Baznat, A. Botvina, G. Musulmanbekov, V. Toneev, and V. Zhezher. Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 17(3):303–324, May 2020.
- [11] M Bleicher, E Zabrodin, C Spieles, S A Bass, C Ernst, S Soff, L Bravina, M Belkacem, H Weber, H Stöcker, and W Greiner. Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 25(9):1859–1896, September 1999.
- [12] V Volkov, M Golubeva, F Guber, A Ivashkin, N Karpushkin, S Morozov, S Musin, and A Strizhak. Approaches in centrality measurements of heavy-ion collisions with forward calorimeters at mpd/nica facility. *Journal of Physics: Conference Series*, 1690(1):012103, December 2020.
- [13] A. Ivashkin, M. Golubeva, F. Guber, N. Karpushkin, S. Morozov, S. Musin, A. Strizhak, and V. Volkov. Measurements of Spectators with Forward Hadron Calorimeter in MPD/NICA Experiment. *Phys. Part. Nucl.*, 52(4):578–583, 2021.