

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»

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ  
ЯДЕР ПО ДАННЫМ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА FHCAL  
НА MPD/NICA**

Студент \_\_\_\_\_ Л. А. Якобнюк

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

Москва 2023

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Определение центральности</b>	<b>4</b>
Теория . . . . .	4
Результат . . . . .	4
<b>2 Моделирование</b>	<b>6</b>
<b>3 Заключение</b>	<b>10</b>
<b>Список литературы</b>	<b>11</b>

# ВВЕДЕНИЕ

Принцип эксперимента MPD заключается в измерении большого числа наблюдаемых параметров столкновений тяжелых ионов в зависимости от энергии столкновения и центральности системы [1]. При взаимодействии тяжелых ионов определение центральности столкновения от события к событию используется для изучения таких наблюдаемых величин, как коллективный поток, множественность частиц и флуктуации, которые сильно зависят от центральности.

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.

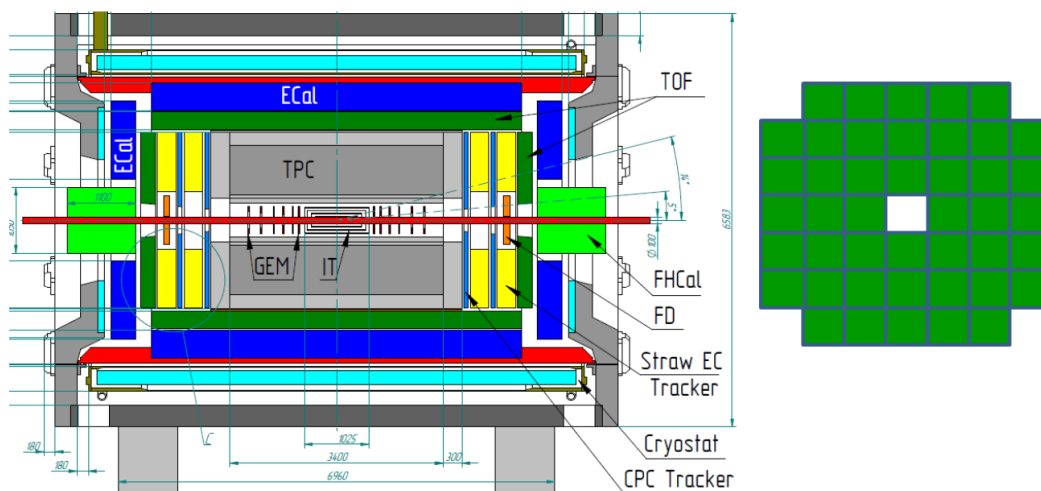


Рисунок 1 — Слева - схема установки эксперимента MPD, справа - структура FHCAL

На рисунке 1 показан вид сбоку эксперимента MPD. Тут мы видим множество детекторов: TPC (время-проекционная камера), электромагнитные калориметры, TOF (времяпролётный детектор), адронный калориметр

прямого хода (FNCal) и др. Множественность частиц при Au-Au соударении и  $\sqrt{S_{NN}} = 11\text{ГэВ}$  около 1000. FNCal предназначен для измерения центральности столкновений частиц. Он состоит из 42 сцинтилляционных плоскостей размером  $15 \times 15 \text{ см}^2$ . Отверстие в центре предназначено для пучка.

# 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ

## ТЕОРИЯ

Центральность может быть определена либо по числу частиц в зоне перекрытия ядер, либо путем измерения энергии, переносимой невзаимодействующими нуклонами (спектаторами) [2]. Измерение количества спектаторов, наблюдающих за метанием снаряда, позволяет оценить число участвующих в соударении нуклонов, а, значит, и прицельный параметр, так как эти величины сильно коррелируют. Очевидно, что при таком способе измерения центральности, наиболее центральные события соответствуют низкому энерговыделению в FHCAL. Но из-за потери фрагментов в отверстии для пучка корреляция искажается для периферийных событий. В результате невозможно отличить центральные и периферийные столкновения, ориентируясь только на данные FHCAL. Для решения этой проблемы находят корреляцию между асимметрией выделения энергии в внешних и внутренних плоскостях FHCAL и энергией пучка, что позволяет разделить центральные и периферийные события.

## ПРАКТИКА

При калибровке калориметра получено, что среднеквадратичное отклонение спектатора даётся формулой

$$\sigma = 0.56 * \sqrt{E_{beam}}, \quad (1)$$

где  $E_{beam}$  - энергия пучка в ГэВ. Несколько попавших в калориметр ( $N_m$ ) спектаторов дают энергию в  $N_m$  раз большую. Но такую же энергию могут дать и другое число частиц, не равное  $N_m$ .

Оценка точности определения числа спектаторов дает 26% резуль-

тат при энергии 5.5 ГэВ на нуклон, а для энергии 2.5 ГэВ на нуклон - 37%. Практически во всем диапазоне центральности относительная ошибка в определении прицельного параметра равна или больше относительной ошибки калибровки при энергии протонов, равной энергии спектатора [3]. Так как нельзя улучшить энергетическое распределение спектатора, то улучшить центральность можно только созданием дополнительного счётчика множественности, который вместе с FHCa1 позволит определять центральность с точностью до 10%.

## 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ

### ПРЯМАЯ ЗАДАЧА

Хотя результаты определения точности центральности и были получены, но их необходимо проверить при моделировании методами Монте-Карло. В результате получено суммарное распределение энергии 100 спектаторов (верное, так как выполняется теорема о дисперсии суммы) и распределение числа спектаторов, которые дадут такое энергосодержание. Они представлены на рисунках ниже.

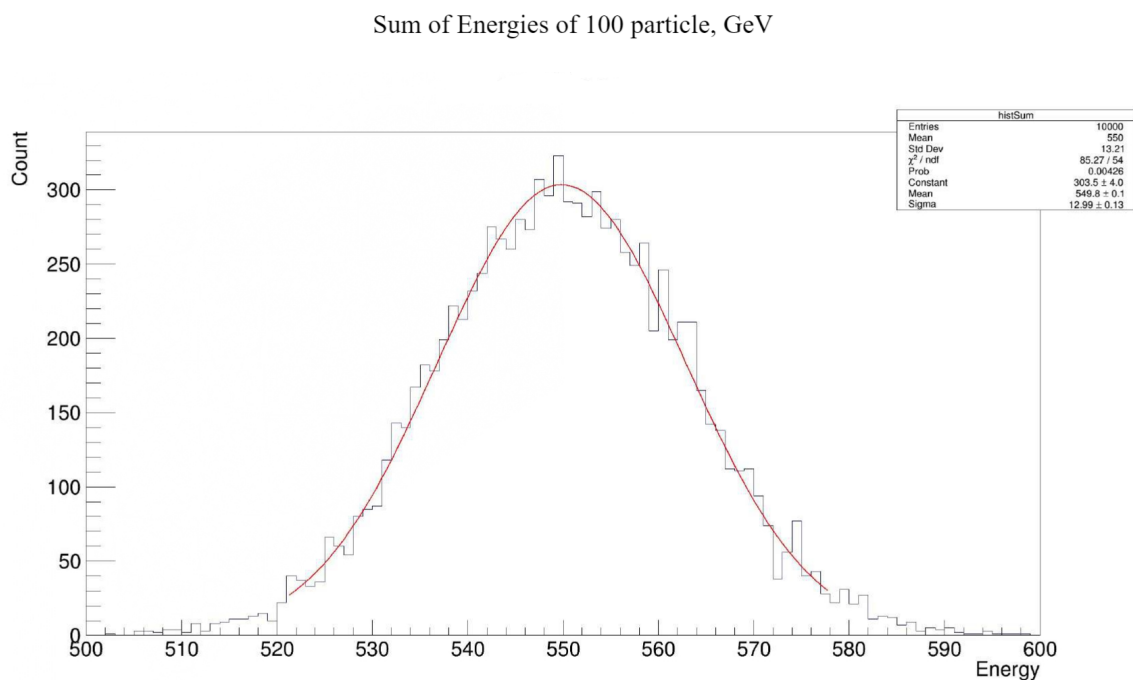


Рисунок 2.1 — Суммарное энергосодержание 100 спектаторов

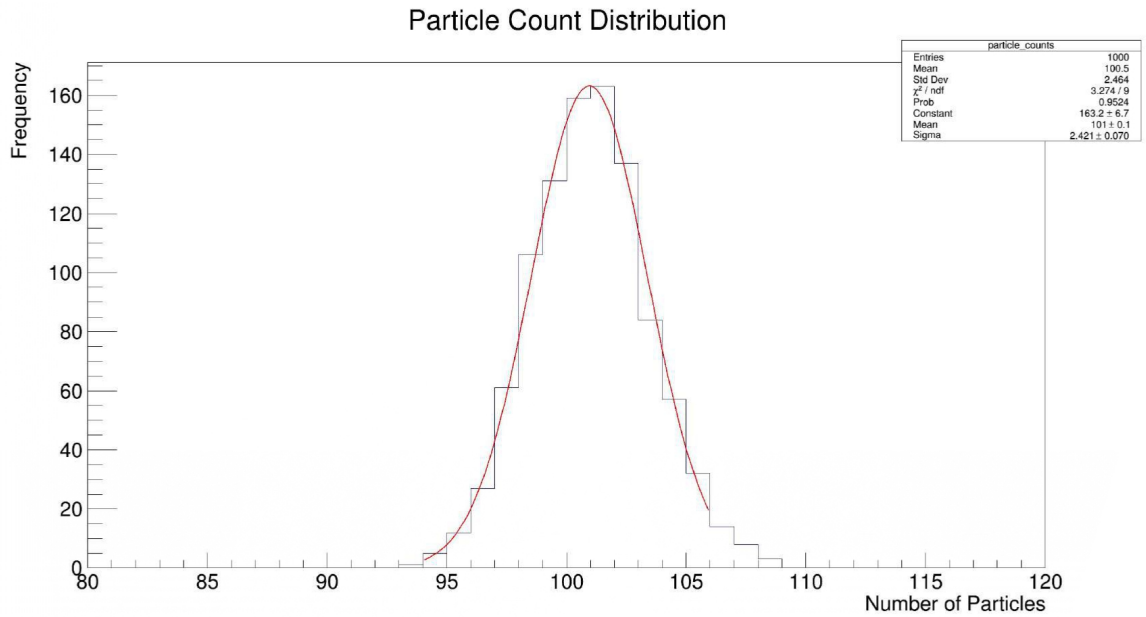


Рисунок 2.2 — Распределение числа частиц, дающих точки на этом распределении энергии

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА

На реальном эксперименте измеряется выделенная энергия, а не число частиц. Поэтому необходимо найти решение обратной задачи. Зафиксируем энергию 200 ГэВ - будем считать, что столько измерил калориметр. Необходимо найти распределение числа спектаторов, которые могут дать такое энерговыделение. Энергию пучка частиц считаем равной 4 ГэВ. Для этого используем теорему Байеса [4].

Калибровка калориметра имеет плотность распределения:

$$w_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(E_i - E_{beam})^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

Далее находим функцию правдоподобия для разного числа спектаторов  $N_s$ :

$$w(N_s) = \prod_{i=1}^{N_s} w_i, \quad (3)$$



где  $\sum_{i=1}^{N_s} E_i = 200 \pm 2$  ГэВ.

Так как функция правдоподобия представляет собой произведение около 50 чисел, каждое из которых лежит в диапазоне от 0 до 1, то необходимо искать её максимизацией значения, полученного из нескольких рангов. Число рангов определяем так, чтобы полученное распределение было физически осмысленным. Для энергии 200 ГэВ необходимо не менее 100 млн рангов.

В результате, используя формулу Байеса, находим искомое распределение спектаторов:

$$\varphi_{E_c}(N_s) = \frac{w(N_s) \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\bar{N}_s - N_s)^2}{2\sigma_s^2}\right)}{\sum_{N_{si,min}}^{N_{si,max}} w(N_{si}) \frac{1}{\sigma_{si} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\bar{N}_s - N_{si})^2}{2\sigma_{si}^2}\right)}, \quad (4)$$

В этой формуле мы полагаем априором распределение спектаторов по Гауссу с средним  $\bar{N}_s = 50$  и среднеквадратичным отклонением

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{N_{si,min}}^{N_{si,max}} (N_{si} - \bar{N}_s)^2}, \quad (5)$$

Результат моделирования представлен на рисунке 2.3. После фитирования получаем  $\bar{N}_{spec} = 47,23 \pm 0,01$  и  $\sigma_{spec} = 1,44 \pm 0,01$ .

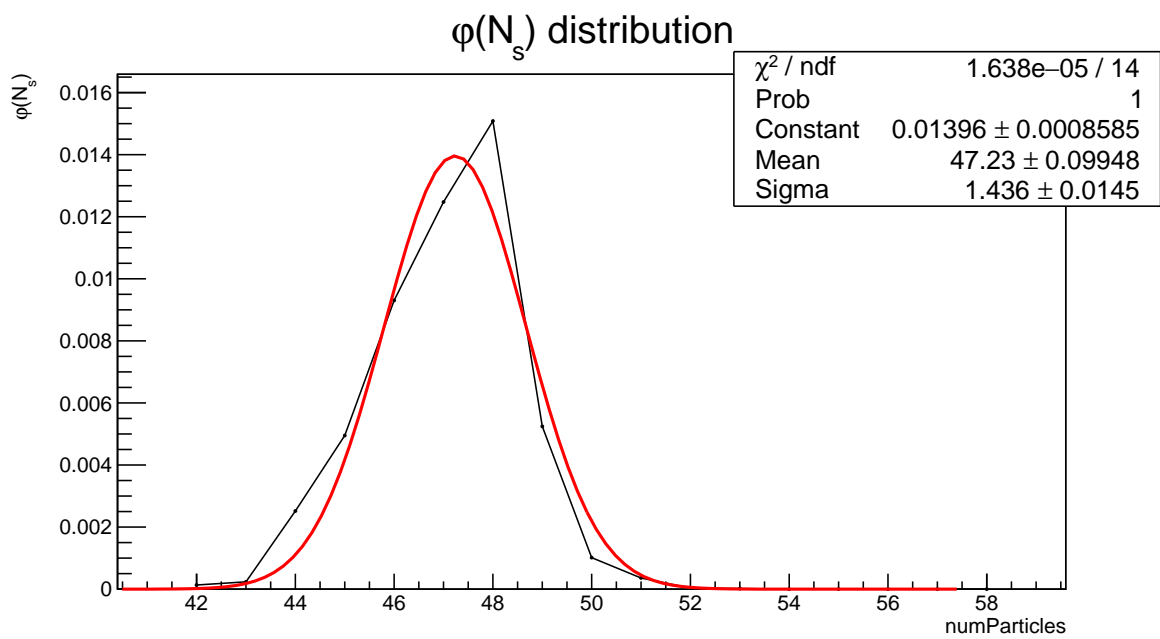


Рисунок 2.3 — Распределение числа спектаторов для энерговыделения 200 ГэВ в калориметре

## 3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение центральности с высокой точностью - очень важно для изучения экспериментальных данных и связи их с теорией, так как от неё зависит степень взаимодействия ядер. Для этого используется детектор FNSal, который измеряет число спектаторов - нуклонов, не участвующих во взаимодействии. Ранее центральность таким способом была измерена так, что точность её определения являлась недопустимой. Это приводит к необходимости Монте-Карло моделирования, в результате которых получены распределения энерговыведения и числа частиц, дающих точки на данном энерговыведении.

Для обратной задачи, которая представляет собой нахождение распределение числа спектаторов для фиксированной энергии, получен результат для энергии  $E_c = 200$  ГэВ:  $\bar{N}_{spec} = 47,23 \pm 0,01$  и  $\sigma_{spec} = 1,44 \pm 0,01$ .

Далее необходимо провести аналогичные расчеты, но для  $E_c = 400$  и  $600$  ГэВ, а также для энергии пучка  $E_b = 2,5$  ГэВ.

## 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] 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.
- [3] А. Б. Курепин, А. Г. Литвиненко, and Е. И. Литвиненко. Определение центральности столкновения ядер при использовании адронного калориметра. *Ядерная физика и инжиниринг*, 11(3):162–165, 2020.
- [4] Giulio D’Agostini. Bayesian reasoning in high-energy physics: principles and applications, 1999.