

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 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	2
1 Определение центральности	4
1.1 Методы определения центральности	4
1.2 Передний адронный калориметр	4
2 Моделирование	6
2.1 Прямая задача	6
2.2 Обратная задача	7
2.2.1 Расчет методом Монте-Карло	7
3 Заключение	12
Список литературы	13

ВВЕДЕНИЕ

Принцип эксперимента MPD заключается в измерении большого числа наблюдаемых параметров столкновений тяжелых ионов в зависимости от энергии столкновения и центральности системы [1, 2]. 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 4π , и предназначен для обнаружения заряженных адронов, электронов и фотонов, образующихся при столкновениях тяжелых ионов в диапазоне энергий и высоких светимостей коллайдера NICA.

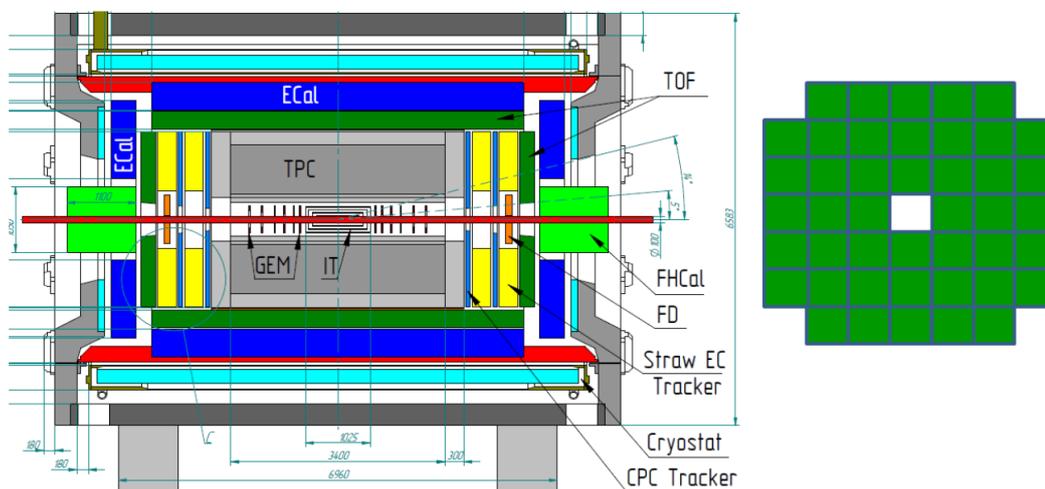


Рисунок 1 — Слева - схема установки эксперимента MPD, справа - структура FHCAL

На рисунке 1 показан вид сбоку эксперимента MPD. Обозначены детекторы установки: TPC (время-проекционная камера), электромагнитные калориметры, TOF (время пролётный детектор), передний адронный ка-

лориметр (FNCal) и др. Множественность частиц при Au-Au соударении и $\sqrt{S_{NN}} = 11$ ГэВ около 1000.

FNCal предназначен для измерения центральности столкновений частиц. Он состоит из 42 сцинтилляционных плоскостей размером 15×15 см². Отверстие в центре предназначено для пучка.

1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ

1.1 МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ

Центральность может быть определена либо по числу частиц в зоне перекрытия ядер, либо путем измерения энергии, переносимой невзаимодействующими нуклонами (спектаторами) [3]. 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.

1.2 ПЕРЕДНИЙ АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

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 по стандартным

программам LAQGSМ и др. дает результат около 5 % при средних центральных при энергии пучка 5.5 ГэВ на нуклон [3]. Улучшить точность определения центральности можно созданием дополнительного счётчика множественности.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1 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.

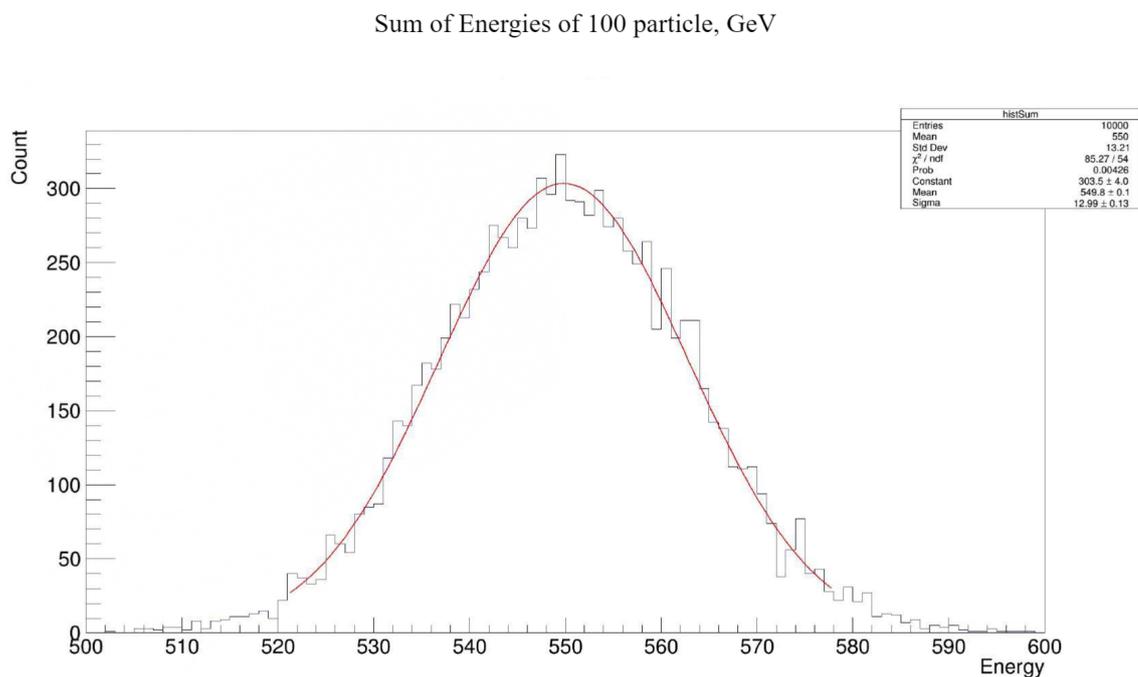


Рисунок 2.1 — Суммарное энергосодержание 100 спектаторов

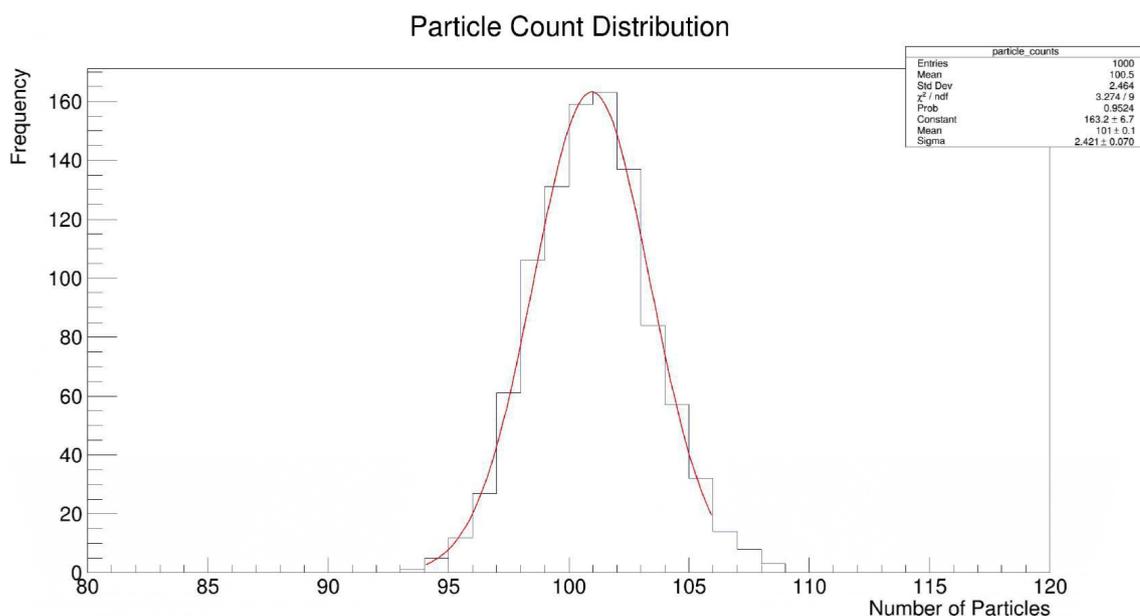


Рисунок 2.2 — Распределение числа частиц, дающих точки на этом распределении энергии

2.2 ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА

2.2.1 РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

На реальном эксперименте измеряется выделенная энергия, а не число частиц. То есть для использования такого подхода, необходимо найти среднее число спектаторов, соответствующее какому-то измеренному значению энергии калориметром. Для маленьких чисел частиц (или энергий) наблюдаются отдельные максимумы в распределении сигнала с адронного калориметра в зависимости от числа спектаторов (энергии). А для большого числа частиц нельзя провести строгое соответствие числа спектаторов и энергии из-за недостаточного энергетического разрешения 2.3

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

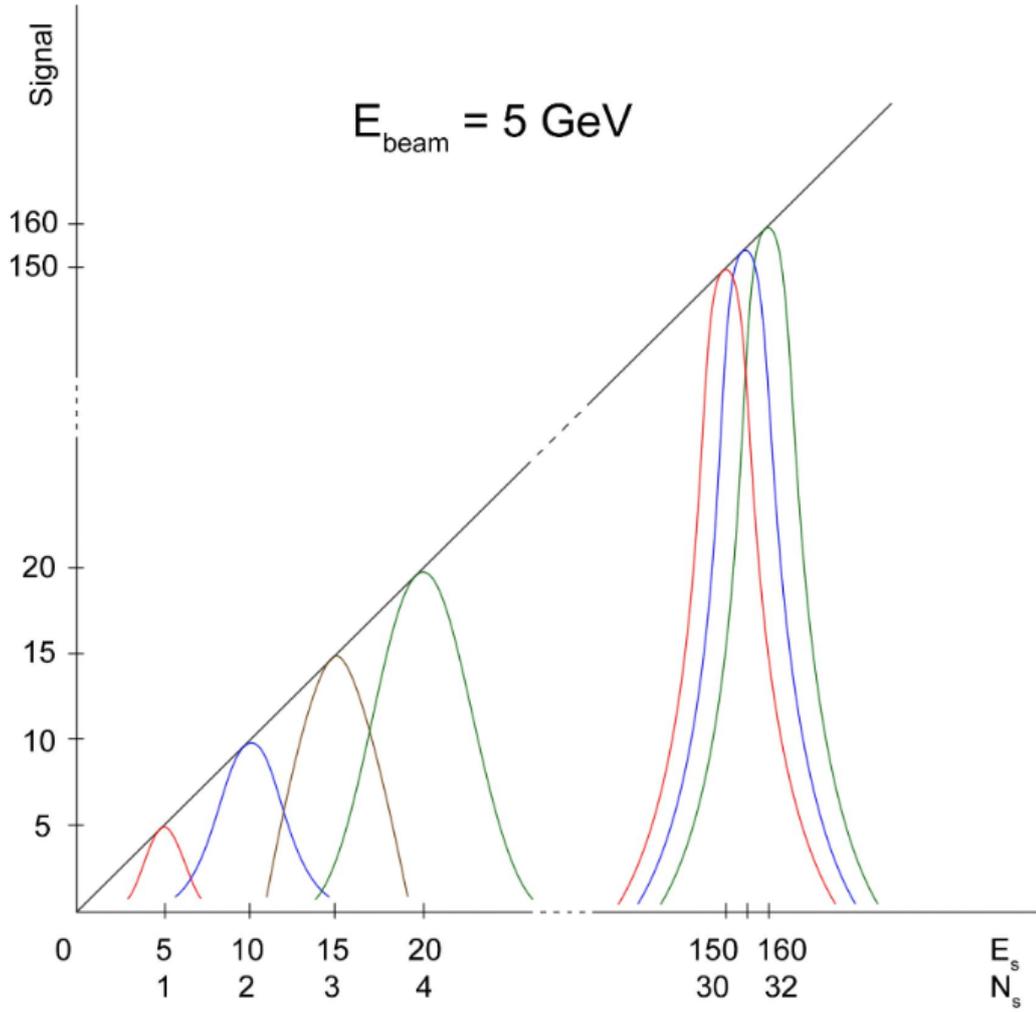


Рисунок 2.3 — Сигнал адронного калориметра в зависимости от числа спектаторов и выделенной ими энергии

используем теорему Байеса [4].

Калибровка калориметра имеет плотность распределения:

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

Далее находим функцию правдоподобия для разного числа спектаторов N_s :

$$w(N_s) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \prod_{i=1}^{N_s} w_i, \quad (3)$$

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 $\sqrt{N_s}$.

Результат моделирования представлен на рисунке 2.4. После фитирования получаем $\bar{N}_{spec} = 49,22 \pm 0,01$ и $\sigma_{spec} = 1,368 \pm 0,002$.

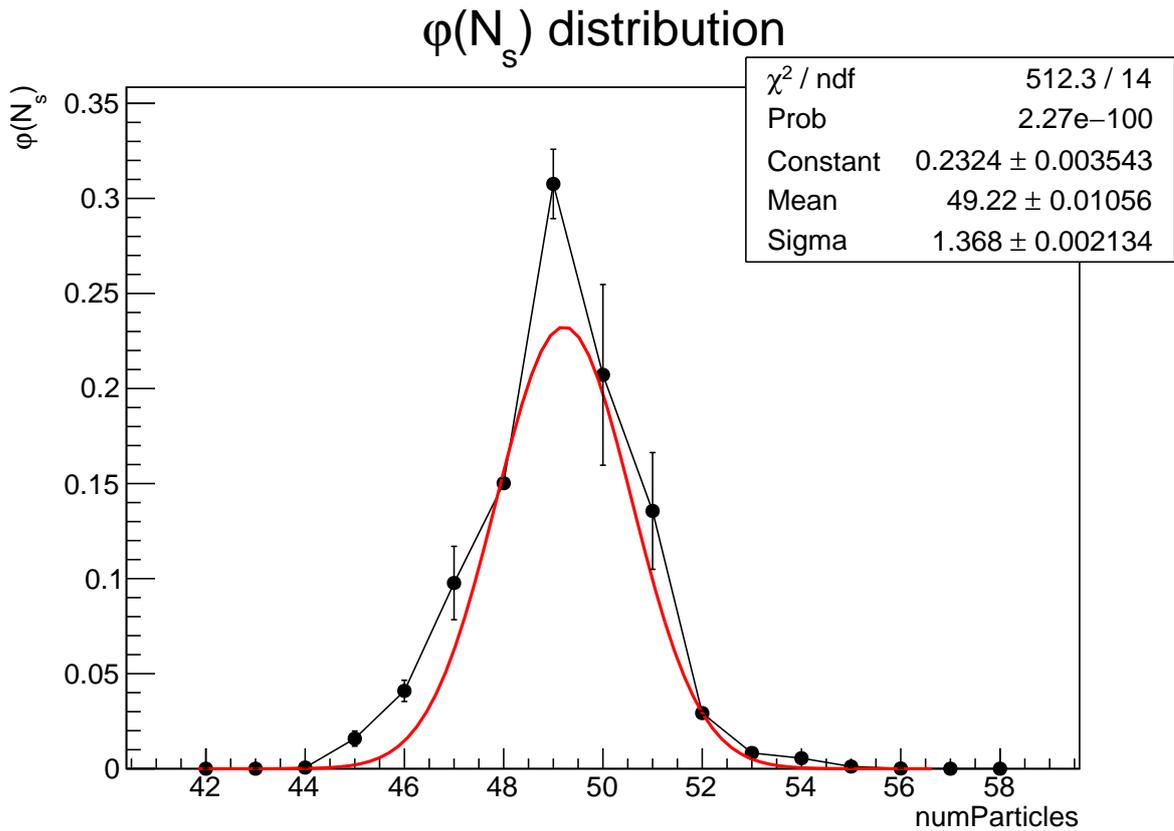


Рисунок 2.4 — Распределение числа спектаторов для энерговыделения 200 ГэВ в калориметре

Проблема данного результата в том, что из-за ограниченного числа рангов в пике распределения имеем слишком маленькое значение. Это видно

на рисунке

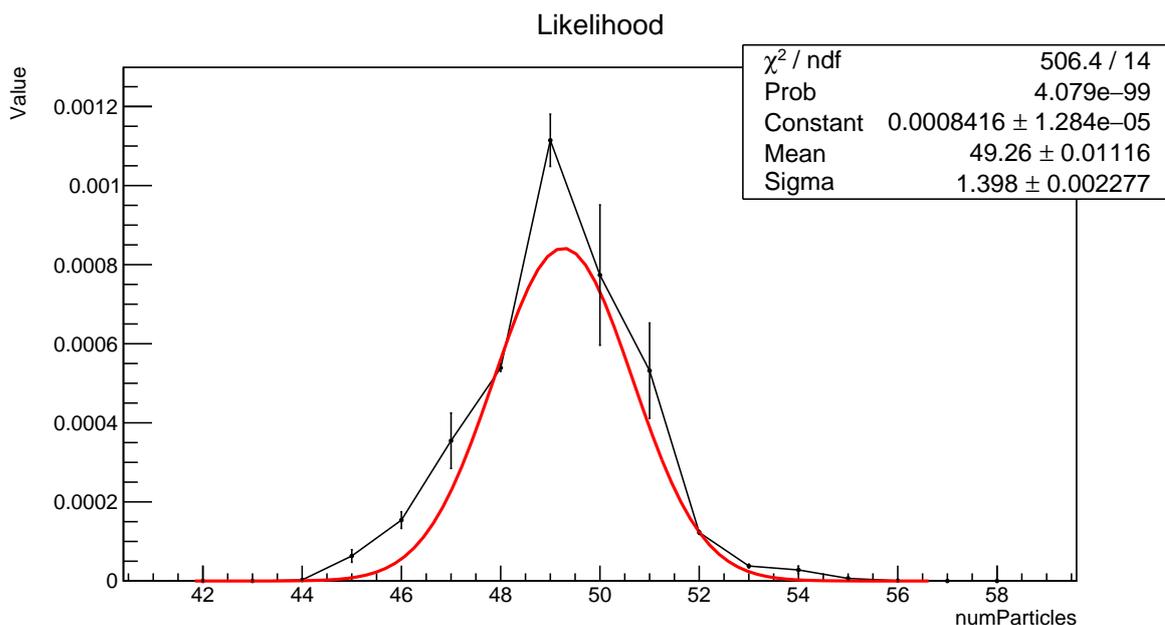


Рисунок 2.5 — Произведение сгенерированных экспонент

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ

Так как полное решение обратной задачи методами Монте-Карло требует очень большого расчетного времени, выполним теоретическое решение с использованием теоремы Байеса и определения суммы вкладов отдельных спектаторов по теории вероятностей. Из калибровки известна плотность распределения энергии, выделенной каждым спектатором (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:

$$P_E(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(E - NE_b)^2}{2N\sigma^2}\right), \quad (5)$$

В дальнейших оценках будем пренебрегать отличием величины выделенной энергии от суммарной энергии N спектаторов. Вероятность выхода $P(N)$ числа N спектаторов при небольших значениях N 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 мате-

матическому ожиданию N . Полная вероятность регистрации энергии E в калориметре равна

$$P(E) = \sum_{N_{min}}^{N_{max}} P_E(N)P(N), \quad (6)$$

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

$$P_{N_s}(E_s) = \frac{P_E(N)P(N)}{P(E)} = \frac{1}{\sigma \cdot 2\pi N_s} \exp\left(-\frac{(E_s - N_s E_b)^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{(\bar{N}_s - N_s)^2}{2N_s}\right), \quad (7)$$

где $\bar{N}_s = \frac{E_s}{E_b}$.

Результат для $E_s = 400$ ГэВ представлен на рисунке 2.6, $\sigma^{teor} \approx 2.7$

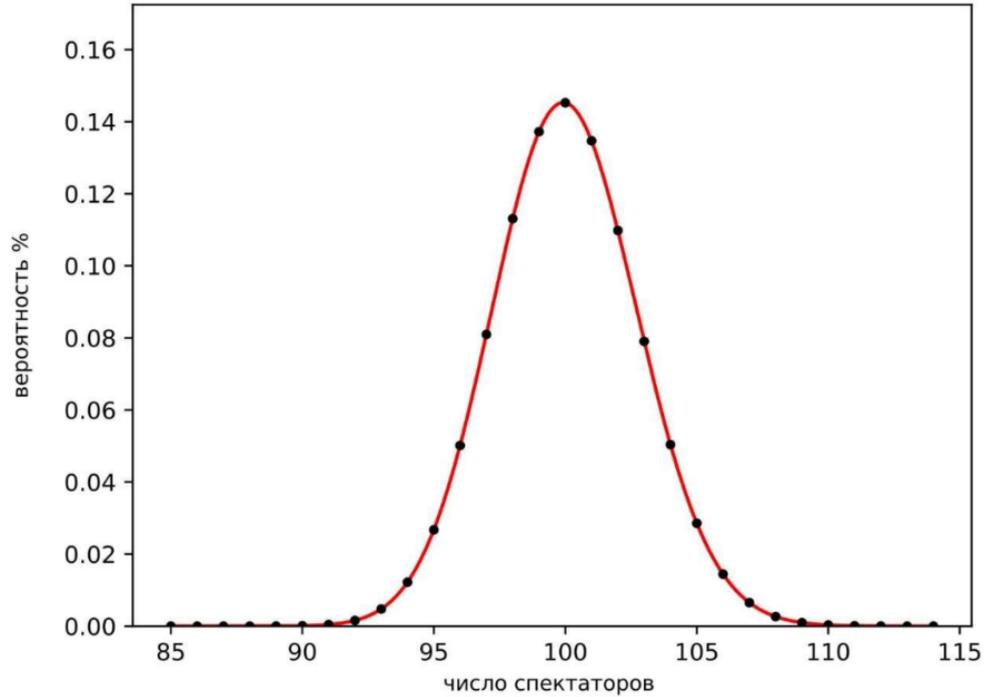


Рисунок 2.6 — Вероятность выхода N_s спектаторов при столкновении тяжелых ядер с $\sqrt{s} = 8$ ГэВ при регистрации энергии 400 ГэВ адронным калориметром

Величина дисперсии распределения энергии калориметра D_E определяется величиной дисперсии распределения (7):

$$D_E = E_b^2 D_N(E), \quad (8)$$

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, а пристальное изучение столкновений тяжелых ядер возможно позволит обнаружить фазовый переход первого рода и образование кварк-глюонной материи. Для этого используется детектор FNCal, 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 распределения числа спектаторов для фиксированной энергии, получен результат для энергии $E_c = 200$ ГэВ: $\bar{N}_{spec} = 49,22 \pm 0,01$ и $\sigma_{spec} = 1,368 \pm 0,002$. Этот результат нельзя считать удовлетворительным, поскольку в максимуме распределения функции правдоподобия получается необъяснимое с точки зрения физики значение. В связи с этим, были выполнены только теоретические расчёты.

В дальнейшем необходимо доработать Монте-Карло алгоритм, либо использовать специальные программы, такие как LAQGSM и DCM-QGSM-SMM или их аналоги.

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] 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.
- [4] Giulio D'Agostini. Bayesian reasoning in high-energy physics: principles and applications, 1999.