

АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР СПЕКТАТОРОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА MRD НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

А. Б. Курепин^{а, 1}, В. С. Попов^{а, 2}, Н. А. Курепин^{а, 3}

^а Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Рассмотрена возможность размещения адронного калориметра спектаторов, предназначенного для определения центральности столкновений, на коллайдере NICA с использованием магнитных элементов коллайдера. Показано, что в результате достигаемого отклонения спектаторов-протонов от основного пучка практически устраняется неоднозначность данных калориметра для центральных и периферических событий.

The feasibility of allocation of a spectator hadron calorimeter, designed to determine the centrality of collisions, at the NICA collider by using the collider's magnetic elements is considered. It is shown that the achieved deflection of the proton spectators from the main beam practically eliminates the ambiguity of the calorimeter data for central and peripheral events.

PACS: 29.30.Kv; 29.40.Wk; 25.40.Fq

ВВЕДЕНИЕ

Адронные калориметры являются одними из основных детекторов на коллайдерах тяжелых ионов. Они позволяют вести измерения полной энергии протонов, нейтронов и фрагментов, испускаемых при столкновении ядер, что важно для проведения экспериментов по поиску указаний на образование кварк-глюонной материи. На действующих установках RHIC и LHC он используется для измерения и изучения струй, определения поперечной энергии, для идентификации мюонов и в сочетании с электромагнитным калориметром для измерения фотонов и электронов. Сооружаемый детектор FoCal на установке ALICE, предназначенный для измерений при больших быструтах, состоит из адронного и электромагнитного калориметров и рассчитан на измерение прямых быстрых фотонов, для инклюзивных и корреляционных измерений фотонов, нейтральных мезонов и струй, что позволит исследовать динамику ядерной материи при малых параметрах Бьеркена.

Однако основным направлением применения адронного калориметра является определение центральности столкновения ядер по измерению числа спектаторов, т. е. числа непрореагировавших нуклонов [1]. Установка ALICE включает нейтронный

¹E-mail: kurepin@inr.ru

²E-mail: mr.vovapopov@yandex.ru

³E-mail: kurepin@theory.sinp.msu.ru

и протонный калориметры, расположенные на больших расстояниях от точки встречи пучков. Измерение полной выделенной энергии нуклонов и фрагментов при прохождении активных и пассивных слоев калориметра, а также калибровка на протонном или мюонном пучках позволяет определить число спектаторов, которое зависит от параметра столкновения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ ЯДЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА

Измерение числа спектаторов, образованных при столкновении ядер, по величине сигнала адронного калориметра позволяет определить центральность столкновений в диапазоне от периферических столкновений с большим числом спектаторов до центральных столкновений, где число спектаторов мало. Соответствующая зависимость выделенной энергии калориметром от прицельного параметра, т. е. от центральности столкновений, была получена по программе UrQMD в одной из первых работ по адронному калориметру установки MPD [2]. Для анализа экспериментальных данных в зависимости от центральности большое значение имеет достижимое разрешение по числу спектаторов и по прицельному параметру. Разрешение по выделенной энергии для одного спектатора было получено по калибровке на протонном и мюонном пучках [3]. Вследствие пропорциональности выделенной энергии от числа спектаторов изменение энергии протонного пучка при калибровке эквивалентно изменению числа спектаторов, что по теореме о дисперсии суммы вкладов приводит к пропорциональности дисперсии энергии пучка. В работе [3] получена зависимость средней квадратичной ошибки от энергии пучка E для одного спектатора:

$$\sigma = 0,56\sqrt{E} \text{ ГэВ.} \quad (1)$$

Суммирование вкладов отдельных спектаторов при заданном их числе N приводит к улучшению относительной точности определения величины сигнала калориметра как $1/\sqrt{N}$. Однако для определения распределения числа спектаторов необходимо решение обратной задачи при заданном значении сигнала калориметра. Такое решение возможно по теореме Байеса [4] при условии независимого вклада отдельных спектаторов, что дает результат, близкий к решению прямой задачи. Для определения точности измеренной центральности необходимо учитывать ковариантность вкладов отдельных спектаторов в полную энергию калориметра. Учет зависимости вклада отдельных спектаторов в полную энергию калориметра приводит к значительному ухудшению разрешения по числу спектаторов [5]. Точность определения центральности также ухудшается вследствие возможности выхода разного числа спектаторов при заданном значении прицельного параметра. Расчет по программе DCM-QGSM-SMM показал, что за счет этой зависимости при средних значениях центральности относительная ошибка достигает 25 % (рис. 1).

Увеличение числа спектаторов-нуклонов при периферическом столкновении возможно также за счет образования фрагментов, включающих некоторое число нуклонов. При размещении адронного калориметра на установке MPD на прямом пучке с отверстием для прохождения пучка это приводит к неоднозначности в определении центральности [2]. Часть спектаторов, заключенных во фрагментах, попадает в это отверстие вследствие меньшего поперечного импульса фрагментов. Следовательно,

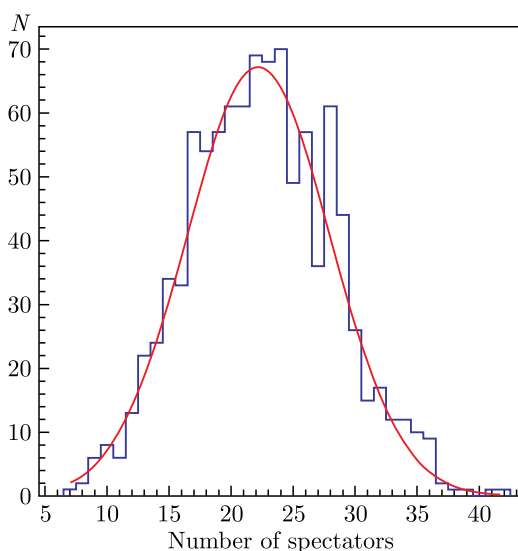


Рис. 1. Распределение числа спектаторов-нуклонов с прицельным параметром 10 Фм

при таком размещении адронный калориметр не может работать в автономном режиме. Учет различия выделенной энергии во внутренней и внешней части калориметра [6], различие продольной и поперечной энергии, выделенной в калориметре [7], а также различие между максимальной и выделенной энергией в блоках калориметра [8] позволяет решить проблему неоднозначности только при высоком разрешении.

Эффективным решением проблемы является использование магнитного поля, которое отклоняет основной пучок, протоны-спектаторы и фрагменты на различные углы. Отклонение основного пучка магнитами на установке ALICE позволило установить как нейтронный, так и протонный калориметры на значительном расстоянии от установки. Компактность установки MPD создает значительные трудности при использовании магнитного поля.

РАЗМЕЩЕНИЕ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

После столкновения в точке встречи каждый из пучков продолжает движение по некоторой центральной траектории. Пучки сопровождаются ореолом из нуклонов-спектаторов, фрагментов, рожденных частиц и фотонов, образованных 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, длиной 1,38 м. Оценки величины отклонения пучка и частиц сделаны при кинетической энергии ядер висмута 4 ГэВ/нуклон и магнитном поле 1,197 Тл без учета краевых эффектов магнитов.

При прохождении магнита MB1 один из пучков ядер висмута отклоняется на 3 см в направлении вниз. Отклонение протона-спектатора в том же направлении составляет 7,4 см. Легкие фрагменты имеют в основном отношение массы к заряду

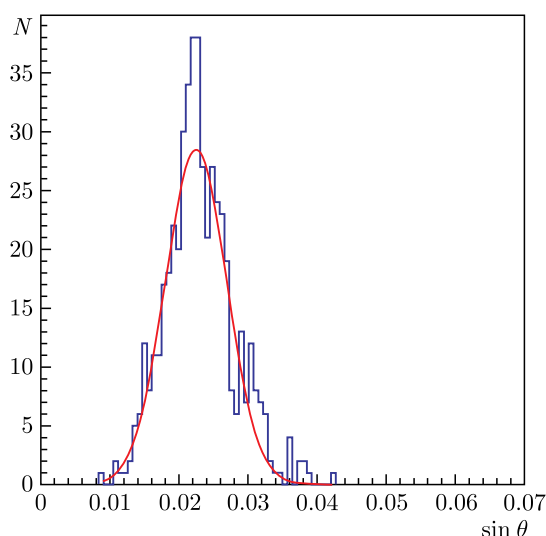


Рис. 2. Распределение угла вылета спектаторов-нуклонов с прицельным параметром 5 Фм

около двух и отклоняются на 4 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 4,4 см.

Изменение угла траектории частиц после прохождения магнита MB1 увеличивает расстояние между пучком ядер висмута и протонами-спектаторами при прохождении 2,5 м до 16 см, что позволяет установить модули калориметра с квадратным сечением 15×15 см в количестве от 12 до 16 шт. на расстоянии нескольких сантиметров от основного пучка.

В поперечном направлении протоны-спектаторы сохраняют импульс Ферми, что размывает пятно протонов на ± 5 см. На рис. 2 показаны результаты расчета по программе DCM-QGSM-SMM распределения угла вылета нуклонов-спектаторов с прицельным параметром 5 Фм. Для фрагментов распределение в два раза более узкое.

На основании расчета отклонения спектаторов в магнитном поле можно сделать оценки зависимости сигнала калориметра от прицельного параметра при эквивалентном смещении областей регистрации и неэффективности калориметра. При этом неэффективные зоны вакуумной трубы и около нее становятся активными и расчет можно провести без магнитного поля. Для спектаторов-протонов это область от пучка до 16 см, для легких фрагментов — до 8 см. Тяжелые фрагменты отклоняются почти как основной пучок, проходят около пучка и не регистрируются калориметром. Расчеты с такой геометрией, где неэффективная зона определяется размерами пучка, показаны на рис. 3, б. Видно, что неоднозначность устраняется. Для сравнения на рис. 3, а приведен результат расчета в геометрии, принятой на установке MPD.

Нейтроны также вносят вклад в величину сигнала калориметра. Их потери определяются областью между калориметром и основным пучком. Но величина этих потерь не зависит от прицельного параметра. Поэтому нейтроны вносят постоянный вклад при всех значениях прицельного параметра и качественно не меняют картину.

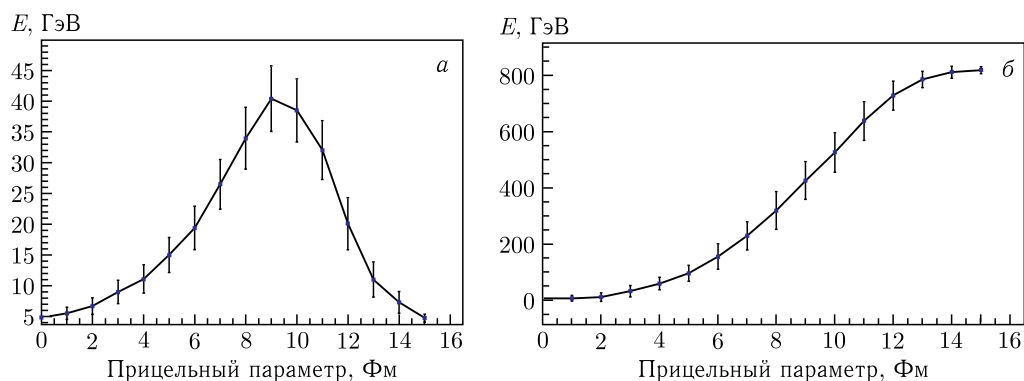


Рис. 3. Зависимость энергии, выделенной в калориметре, от прицельного параметра, рассчитанная по модели DCM-QGSM-SMM (а) для калориметра FHCAL (MPD), для проекта размещения калориметра с использованием магнитного поля MB1 (б), диаметр пучка — 2 мм, расстояние до магнита MB1 — 250 см, размер калориметра — 60×60 см

При таком расположении модулей адронного калориметра обеспечивается плавное увеличение выделенной в калориметре энергии соответственно увеличению числа спектаторов-протонов и легких фрагментов вплоть до центральностей, эквивалентных параметру столкновения 12 Фм. Однако при образовании тяжелых фрагментов при ультрапериферическом столкновении, уходящих вместе с основным пучком, возможен выход небольшого числа протонов-спектаторов, дающих сигнал в калориметре, аналогичный центральному столкновению. Для того, чтобы избежать искажения спектра адронного калориметра, необходимо установить несколько модулей электромагнитного калориметра ECal, изготовленных для установки MPD, на небольшом расстоянии от точки встречи. Они должны давать триггерный сигнал для считывания информации адронного калориметра.

На рис. 4 показано предлагаемое размещение модулей адронного и электромагнитного калориметров и расчетные отклонения основного пучка ядер висмута и протонов-спектаторов. Блоки адронного калориметра HCal с входным квадратным сечением 15×15 см и длиной 106 см в количестве до 16 шт. устанавливаются навстречу пучку, ниже вакуумной трубки. Модули электромагнитного калориметра, от 2 до 4 шт., размещаются в области квадрупольных ФФЗ вплотную к вакуумной трубке. Каждый модуль состоит из 16 ячеек-башен с входным сечением 4×4 см и длиной около 60 см.

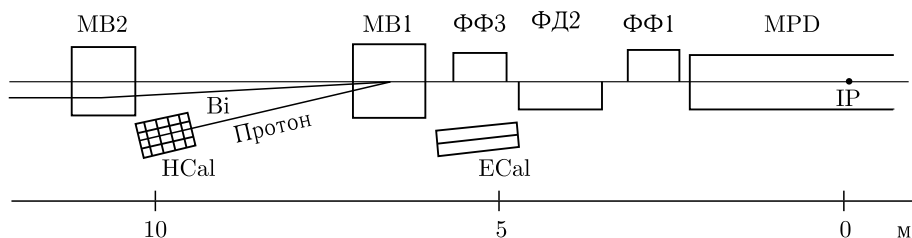


Рис. 4. Схема размещения адронного калориметра на коллайдере NICA

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренное предложение может быть первым экспериментом по определению центральности столкновений и светимости по Ван дер Меру на коллайдере NICA. Однако такое расположение адронного и электромагнитного калориметров возможно также при работе установки MPD с использованием двух сборок детекторов с обеих сторон от установки. Размещение адронного калориметра на расстоянии около 10 м от установки позволит отказаться от громоздких и тяжелых блоков адронного калориметра на входе и выходе установки, а также уменьшит фон на центральные детекторы, возникающий от облучения блоков калориметра частицами, рожденными и рассеянными при столкновении.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *MPD Collab.* Status and Initial Physics Performance Studies of the MPD Experiment // Eur. Phys. J. A. 2022. V. 58. P. 140–191.
2. Golubeva M. B., Guber F. F., Ivashkin A. P., Isupov A. Yu., Kurepin A. B., Litvinenko A. G., Litvinenko E. I., Migulina I. I., Peresedov V. F. // Phys. At. Nucl. 2013. V. 76, No. 1. P. 1–15.
3. Guber F., Borisenko D., Finogeev D., Golubeva M., Ivashkin A., Karpushkin N., Morozov S., Senger A. // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 204. P. 07007.
4. Курепин Н. А., Якобнюк Л. А., Курепин А. Б., Попов В. С. // Учен. записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2024. № 5. P. 1–4.
5. Kurepin A. B., Litvinenko A. G., Litvinenko E. I. // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83, No. 9. P. 1–4.
6. Ivashkin A., Finogeev D., Golubeva M., Guber F., Izvestnyy A., Morozov S., Strizhak A. // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 204. P. 07002.
7. Volkov V., Golubeva M., Guber F., Ivashkin A., Karpushkin N., Morozov S., Musin S., Strizhak A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1690. P. 012103.
8. Ivashkin A., Golubeva M., Guber F., Karpushkin N., Morozov S., Musin S., Strizhak A., Volkov V. // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 4. P. 578–583.

Получено 29 октября 2025 г.