

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ Au + Au-СТОЛКНОВЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BM@N

*Н. А. Лашманов* \*, *С. А. Седых*, *В. И. Юревич*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Работа посвящена моделированию характеристик триггерных детекторов и эффективности триггера взаимодействия с целью его модернизации для изучения Au + Au-столкновений на установке BM@N. Исследование проводится с помощью моделирования на основе кода DCM-QGSM + GEANT4. Даны рекомендации по изменению геометрии детекторов мишенной зоны с целью подавления фона от  $\delta$ -электронов. Показано, что включение в триггер быстрого взаимодействия информации от детектора фрагментов ядер пучка и адронного калориметра обеспечивает более надежный отбор событий по центральности.

The work is devoted to simulation of the characteristics of trigger detectors and the efficiency as a part of the upgrade program of the BM@N facility for study of Au + Au collisions. The study is carried out using the DCM-QGSM + GEANT4 code-based simulation. Recommendations for changing the geometry of the target zone of detectors in order to suppress the background from  $\delta$ -electrons are given. It is shown that the inclusion of information from the detector of fragments of the beam nuclei and the hadron calorimeter into the trigger of the fast interaction provides a more reliable selection of events by centrality.

PACS: 25.75.-q; 07.77.Ka

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование свойств горячей и плотной ядерной материи, образующейся в результате ядро-ядерных столкновений, является основным направлением эксперимента BM@N в ЛФВЭ ОИЯИ [1, 2]. В настоящее время проводится модернизация установки BM@N с целью ее подготовки к изучению Au + Au-столкновений при энергиях нуклотрона. При этом создание надежного быстрого триггера взаимодействия в мишени является важной частью программы модернизации.

Проект триггера взаимодействия включает в себя систему сцинтилляционных и черенковских счетчиков частиц пучка, расположенных перед

---

\* E-mail: lashmanov@jinr.ru

мишенью, детекторы мишенной зоны, регистрирующие вторичные заряженные частицы от взаимодействия в мишени, а также детекторы, регистрирующие высокоэнергетические частицы, возникающие в результате фрагментации налетающих ядер в Au + Au-столкновениях. Мишенная зона расположена внутри анализирующего магнита с магнитным полем  $B = 0,9$  Тл.

Детекторами мишенной зоны являются многоканальные сцинтилляционный (Barrel Detector, BD) и кремниевый (Silicon Detector, SiD) детекторы. Их отклики коррелируют с множественностью вторичных заряженных частиц, образующихся в ядро-ядерном взаимодействии, что позволяет выделять центральность столкновения. Основной фоновый вклад в отклики детекторов BD и SiD вносят  $\delta$ -электроны, генерируемые пучковыми ионами в мишени. Численное описание этого эффекта и оптимизация защиты и геометрии триггерных детекторов мишенной зоны с целью уменьшения фона — задачи настоящей работы.

Детекторами, регистрирующими спектры, вылетающие вперед под малыми углами и с высокой энергией (нейтроны и заряженные фрагменты пучкового ядра), являются детектор фрагментов (FD) и адронный калориметр (FHCAL) [3]. FHCAL расположен на расстоянии 9 м от мишени и имеет отверстие для пучка, отклоненного анализирующим магнитом установки BM@N. FD расположен перед отверстием в калориметре, и размер его активной области позволяет надежно регистрировать все ядерные фрагменты с  $Z > 2$ . В проекте триггера взаимодействия предполагается использовать отклик FD для наложения вето на событие при отсутствии взаимодействия в мишени, а также использовать нейтронный отклик в FHCAL, зависящий от прицельного параметра, для определения центральности столкновений. В настоящей работе изучалась возможность включения откликов этих детекторов в триггерный сигнал.

В проведенном исследовании моделирование выполнено на основе кодов DCM-QGSM [4] и GEANT4 [5] для случая Au + Au-столкновений при энергии 4 ГэВ/нуклон.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ МИШЕННОЙ ЗОНЫ

Многоканальные детекторы BD и SiD схематично показаны на рис. 1. BD состоит из 40 сцинтилляционных стрипов размером  $150 \times 7 \times 7$  мм, состыкованных на одном конце с SiPM размером  $6 \times 6$  мм. Радиус расположения сцинтилляционных стрипов от оси пучка составляет 46 мм. Кремниевый детектор SiD имеет толщину 525 мкм и состоит из 64 стрипов, сгруппированных в 8 трапециевидных секторов с внутренним и внешним радиусами 25 и 93 мм соответственно. Полное число каналов детекторов множественности — 104. Такая сегментация детекторов обес-

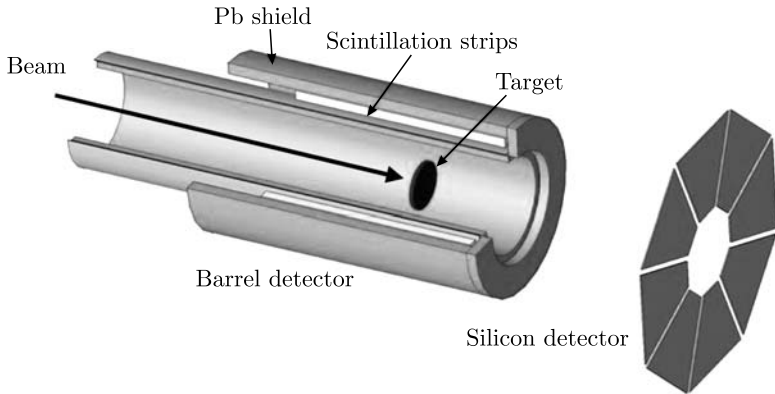


Рис. 1. Геометрия детекторов множественности эксперимента BM@N

печивает эффективный отбор ядерных взаимодействий по прицельному параметру в зависимости от количества сработавших стрипов.

Сеанс с пучками ядер Ag и Kг показал, что фон от  $\delta$ -электронов, образующихся в мишени, вносит существенный вклад в количество срабатывающих каналов BD и SiD. При этом максимальный вклад ожидается в сеансах с наиболее тяжелыми ионами пучка — ядрами Au. Этот фон снижает способность детекторов определять взаимодействия в мишени, так как триггерные сигналы могут генерироваться в событиях, когда входящий ион пучка проходит мишень без взаимодействия.

При моделировании характеристик детекторов множественности для Au + Au-столкновений использовалась золотая мишень толщиной 300 мкм, вероятность взаимодействия в которой составляет  $\sim 1\%$ . Канал детектора BD считался сработавшим, если энерговыделение в соответствующем сцинтилляционном стрипе превосходило 400 кэВ. Аналогично для срабатывания каналов SiD-детектора выбирался порог 30 кэВ. Для оценки частоты фоновых срабатываний триггера разыгрывались события, в которых налетающее ядро проходило мишень без взаимодействия, а срабатывание каналов детекторов вызывалось только попадающими в них  $\delta$ -электронами.

С целью подавления этого фона в BD-детекторе были изучены различные способы защиты активной области детектора свинцовыми экранами. Установлено, что защита, выполненная в виде внутреннего цилиндра толщиной 5 мм, внешнего цилиндрического экрана толщиной 10 мм и кольцевого экрана толщиной 10 мм со стороны торца, приводит к приемлемому подавлению вклада от  $\delta$ -электронов в множественность срабатывающих каналов детектора BD.

Проведенные исследования показали, что значительного уменьшения фона в SiD-детекторе можно достигнуть путем увеличения расстояния от мишени до детектора до предельного значения 120 мм, определяемого

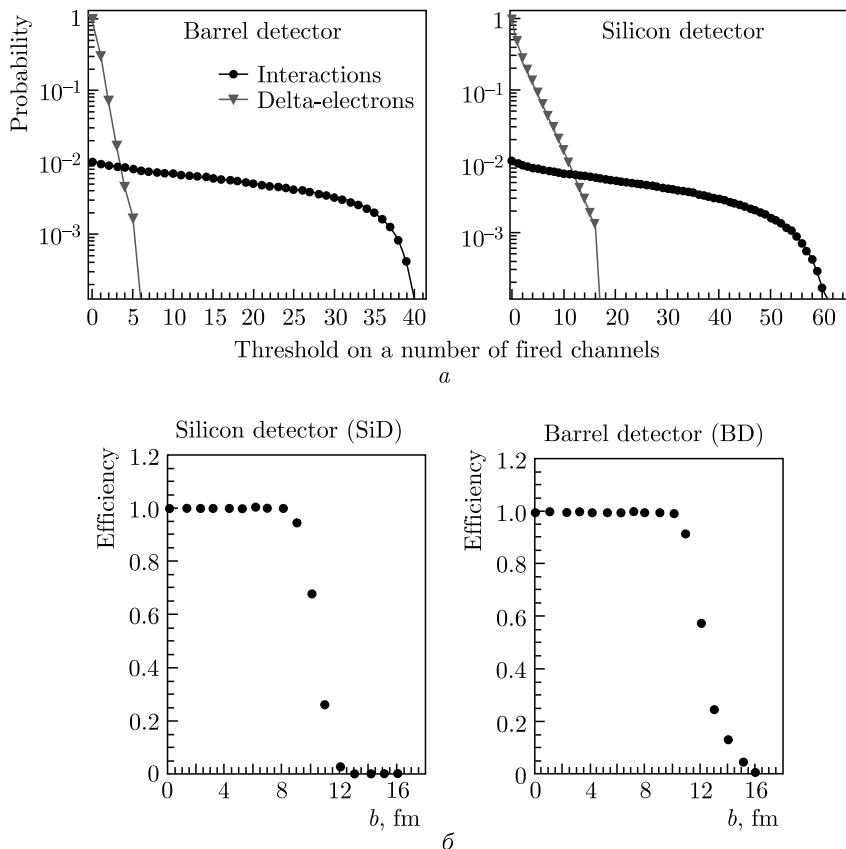


Рис. 2. а) Вероятность истинного (кружки) и ложного (треугольники) триггерного сигнала в зависимости от числа сработавших каналов в BD-детекторе (слева) и SiD-детекторе (справа) при регистрации Au + Au-столкновений. б) Эффективность детекторов (BD, SiD) при регистрации Au + Au-столкновений в зависимости от прицельного параметра

расположением трековых детекторов BM@N внутри анализирующего магнита. При этом большая часть  $\delta$ -электронов отклоняется в магнитном поле и не попадает в активную область SiD, в то время как вероятность регистрации вторичных частиц от ядерных взаимодействий остается высокой.

На рис. 2, а показана вероятность генерации триггера в зависимости от числа сработавших каналов в детекторах для двух случаев: частицами от Au + Au-взаимодействий в мишени и  $\delta$ -электронами при отсутствии взаимодействия. Полученные результаты показывают, что достаточного подавления фонового вклада в генерацию триггерного сигнала можно

достичь, применяя пороги на число сработавших каналов: 6 каналов в VD и 17 каналов в SiD. При таких значениях порогов доля фоновых событий в зарегистрированных данных не будет превышать 10%.

Полученные при этом значения эффективности выработки триггерных сигналов детекторами VD и SiD в зависимости от прицельного параметра представлены на рис. 2, б. Из приведенных распределений видно, что детекторная система чувствительна к центральным и полуцентральному столкновениям со 100%-й эффективностью, и только для периферических столкновений эффективность убывает с увеличением прицельного параметра. Также стоит отметить, что селективность триггера возрастает с использованием более тонких мишеней, поскольку при уменьшении толщины мишени число фоновых  $\delta$ -электронов уменьшается, а число вторичных частиц от ядро-ядерных столкновений остается неизменным.

## ИЗУЧЕНИЕ ДЕТЕКТОРА ФРАГМЕНТОВ И АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА

В будущих сеансах на установке BM@N пучки тяжелых ионов будут транспортироваться по вакуумному тракту вплоть до адронного калориметра (FHCAL), который имеет отверстие для пучка, отклоненного анализирующим магнитом установки BM@N. Детектор фрагментов (FD) предполагается разместить за вакуумной трубой непосредственно перед калориметром, расположенным на расстоянии 9 м от мишени. Активная область детектора фрагментов имеет поперечные размеры  $160 \times 160$  мм. FD состоит из 4 кварцевых пластин размером  $160 \times 40 \times 6$  мм, черенковский свет регистрируется с обоих торцов каждой пластины с помощью нескольких SiPM. Задачей FD является регистрация пучковых ионов Au в событиях без взаимодействия и быстрых ядерных фрагментов, образующихся при взаимодействии ионов Au в мишени.

Калориметр FHCAL состоит из двух типов модулей с поперечными размерами  $150 \times 150$  мм и  $200 \times 200$  мм. Он регистрирует высокоэнергетические адроны и легчайшие ядра изотопов водорода и гелия, попадающие под малыми углами из области взаимодействия в мишени. В полном исследовании изучалась возможность включения откликов от FD и FHCAL в триггер взаимодействия.

На рис. 3, а показано двумерное  $X$ - $Y$ -распределение попавших в FD ядерных фрагментов, а на рис. 3, б — зависимость отклика FD в виде суммы квадратов зарядов ядерных фрагментов от прицельного параметра. Активная область детектора позволяет надежно регистрировать все ядерные фрагменты с зарядом  $Z > 2$ . При этом отклик детектора сильно возрастает с появлением тяжелых фрагментов с большим значением заряда в периферических столкновениях, а для центральных и полуцентральных столкновений отклик FD мал и не позволяет проводить

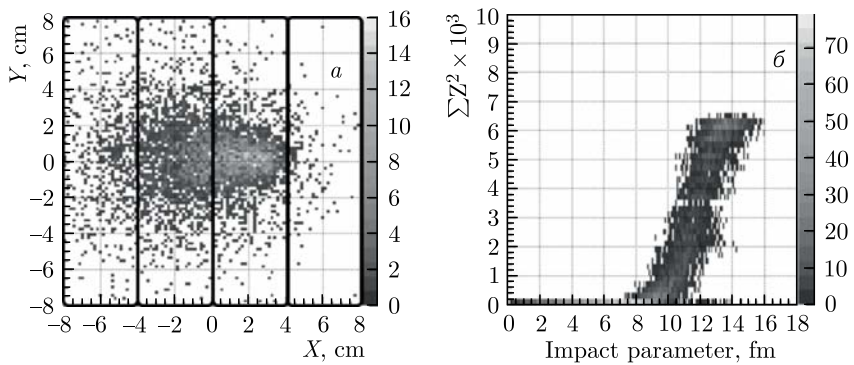


Рис. 3. а) Распределение заряженных фрагментов с зарядами  $Z > 2$  в FD; б) сумма квадратов зарядов фрагментов, попавших в FD, в зависимости от прицельного параметра

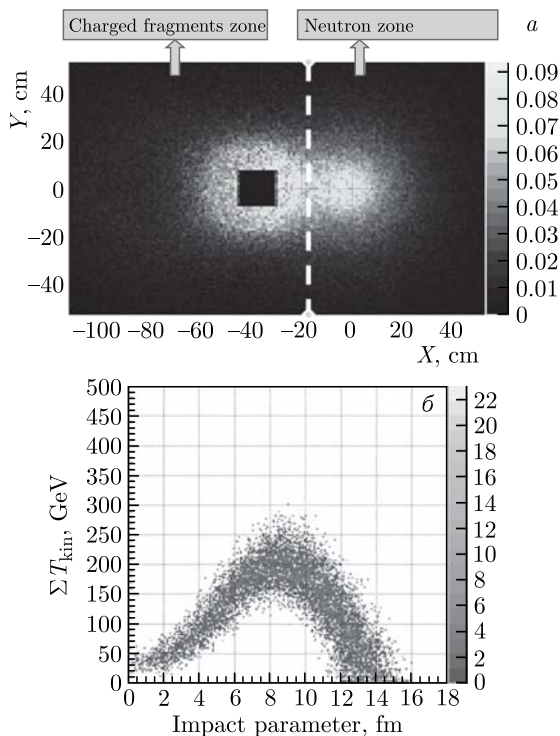


Рис. 4. а) Энергетическое распределение фрагментов в области FHCAL; б) распределение полной кинетической энергии нейтронов в FHCAL в зависимости от прицельного параметра

селекцию взаимодействий по прицельному параметру. Таким образом, FD может быть использован для генерации *minimum bias* триггера, позволяющего отбирать Au + Au-взаимодействия, в которых налетающее ядро Au отсутствует после прохождения мишени, а также для получения дополнительной информации о столкновении в последующем анализе.

Двумерное  $X$ - $Y$ -распределение кинетической энергии адронов и фрагментов, падающих на FHCaI, представлено на рис. 4, а. Видно, что хорошо выделяются две зоны, потенциально важные для генерации триггерного сигнала.

В первую зону, концентрирующуюся вокруг отверстия в калориметре, попадают заряженные частицы, траектории которых отклонены полем анализирующего магнита VM@N. Во вторую зону, хорошо отделяющуюся от первой, попадают спектаторные нейтроны, летящие в прямом направлении без отклонения магнитным полем. На рис. 4, б показано распределение полной кинетической энергии нейтронов в FHCaI в зависимости от прицельного параметра.

Детальное изучение нейтронной области показало, что суммарная энергия нейтронов, попадающих на FHCaI, имеет сильную зависимость от прицельного параметра, что может быть использовано для определения центральности столкновения.

## КОНЦЕПЦИЯ ТРИГГЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Проведенное моделирование показало возможность реализации следующей концепции быстрого триггера взаимодействия для Au+Au-столкновений. Для отбора периферических событий можно исполь-

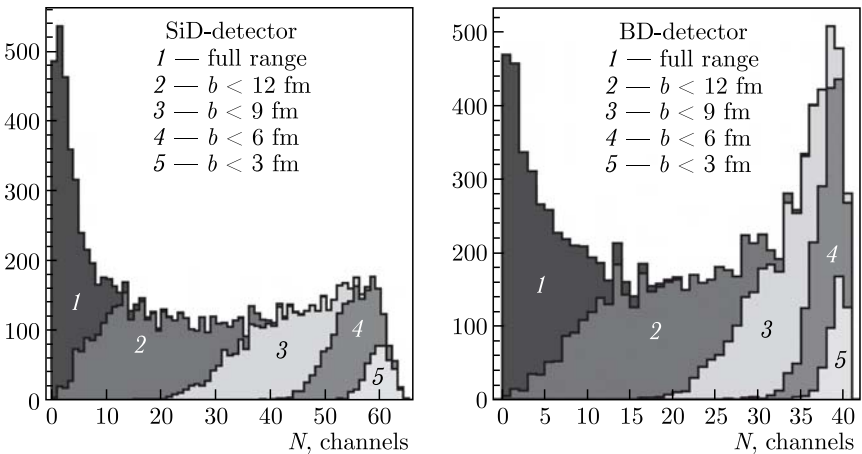


Рис. 5. Количество сработавших каналов в детекторах множественности (SiD, BD) при регистрации Au + Au-столкновений в зависимости от прицельного параметра

зовать отклики с FD и FNCal. Реализация данного варианта предполагает установку высокого порога по амплитуде импульса FD, исключающего регистрацию ионов Au, и низкого порога на нейтронный отклик FNCal. Для выделения центральных и полужентральных столкновений можно использовать отклики BD, SiD и FNCal. Этот вариант реализуется путем установки соответствующих порогов по числу сработавших каналов в BD и SiD, а также порога по амплитуде суммарного импульса от модулей FNCal в нейтронной зоне.

На рис. 5 показаны распределения множественности сработавших каналов в детекторах SiD и BD для различных интервалов прицельного параметра в Au + Au-столкновениях при энергии 4 ГэВ/нуклон.

Как видно из полученных результатов, при переходе к более центральным столкновениям множественность сработавших каналов в BD и SiD возрастает. При этом нейтронный отклик в FNCal уменьшается, как это показано на рис. 4, б.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная триггерная система для регистрации ядро-ядерных взаимодействий в эксперименте BM@N включает в себя детекторы мишенной зоны BD и SiD, а также черенковский детектор фрагментов FD и адронный калориметр FNCal. Фон от  $\delta$ -электронов удаётся существенно снизить путем использования свинцовой защиты вокруг сцинтилляторов детектора BD и увеличения расстояния между мишенью и детектором SiD. Эти детекторы являются основными в отборе событий по центральности в области прицельного параметра  $b < 12$  фм.

Включение в триггер детектора ядерных фрагментов FD позволяет организовать эффективный триггер в широком диапазоне прицельного параметра, включающем периферические столкновения. Совместное использование отклика FD на ядерные фрагменты и отклика FNCal на нейтроны обеспечивает более надёжный отбор событий по центральности.

Предложенная триггерная система обладает высокой эффективностью для выделения ядро-ядерных взаимодействий в мишени. Полученные результаты являются основой для модернизации быстрого триггера взаимодействий при подготовке к сеансам BM@N на пучках тяжелых ионов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M. N. (BM@N Collab.). The Fixed Target Experiment for Studies of Baryonic Matter at the Nuclotron (BM@N) // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 213.*
2. *Yurevich V. I. et al. Beam Tests of Cherenkov Detector Modules with Picosecond Time Resolution for Start and LO Trigger Detectors of MPD and BM@N Experiments // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 778.*



3. *Guber F. et al.* New Forward Hadron Calorimeter for Centrality and Reaction Plane Determination at BM@N Heavy Ion Experiments // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 204. P. 07007.
4. *Toneev V.D., Gudima K.K.* Particle Emission in Light and Heavy Ion Reactions // Nucl. Phys. A. 1983. V. 400. P. 173–190.
5. *Apostolakis J. et al.* Geometry and Physics of the Geant4 Toolkit for High and Medium Energy Applications // Radiat. Phys. Chem. 2009. V. 78. P. 859–873.