

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРИГГЕРА В СЕАНСЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ВМ@N С ПУЧКОМ ИОНОВ КСЕНОНА С КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ 3,8А ГэВ

В. А. Плотников^{а, 1}, М. Н. Капишин^а

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Показана методика оценки эффективности, а также систематической погрешности эффективности триггерной системы при отборе событий столкновений (основного триггера взаимодействий). Обнаружено, что важным фактором, приводящим к снижению эффективности триггера, является прохождение двух и более ионов пучка в интервале времени срабатывания триггера. Предложен способ отбора событий для анализа, позволяющий уменьшить влияние этого фактора, а также сохранить статистику событий. Показано изменение параметров различных триггерных элементов в течение всего сеанса.

The paper shows a method for assessing the efficiency and systematic error of the trigger system efficiency when selecting collision events (the main interaction trigger). It is found that an important factor leading to a decrease in the trigger efficiency is the passage of two or more beam ions in the trigger response time interval. A method for selecting events for analysis is proposed, which allows reducing the influence of this factor and saving event statistics. The change in the parameters of various trigger elements during the entire session is shown.

PACS: 29.85.—с

ВВЕДЕНИЕ

Триггерная система эксперимента позволяет для записи отбирать события столкновений ионов с требуемыми характеристиками. В эксперименте ВМ@N [1] изучаются неупругие столкновения. Записываются события в полном диапазоне по центральности столкновений от самых центральных до периферических. Параметры триггера подбираются таким образом, чтобы добиться оптимального соотношения между скоростью записи информации и эффективностью триггера.

Оценка эффективности триггера необходима для получения корректных физических результатов, в том числе выходов различных частиц [2]. Эффективность триггера чувствительна к центральности столкновения, особенно для периферических взаимодействий. В качестве параметра, используемого для оценки центральности в событии при расчете эффективности триггерных элементов, в данной работе используется число реконструированных треков, по которым восстановлена первичная вершина столкновения.

¹E-mail: vplotnikov@jinr.ru

В сеансе с пучком ионов ксенона относительно небольшая часть данных набиралась с использованием нескольких вспомогательных триггеров. Остальные события были набраны с основным триггером. Целью данной работы является оценка эффективности основного триггера.

1. ОПИСАНИЕ ТРИГГЕРНОЙ СИСТЕМЫ

Подробное описание триггерной системы в сеансе 2022–2023 гг. представлено в работе [3]. На рис. 1 показана схема установки BM@N. В ее триггерную систему входят пучковые счетчики BC1 (3) и BC2 (5), счетчик вето (4), детектор множественности типа «баррель» (BD) (8), детектор фрагментов (FD) (16).

Факт прохождения пучковой частицы в области мишени регистрирует пучковый триггер (BT). Он формируется на основе сигналов BC1, BC2 и VC:

$$BT = BC1 \times BC2 \times \overline{VC}.$$

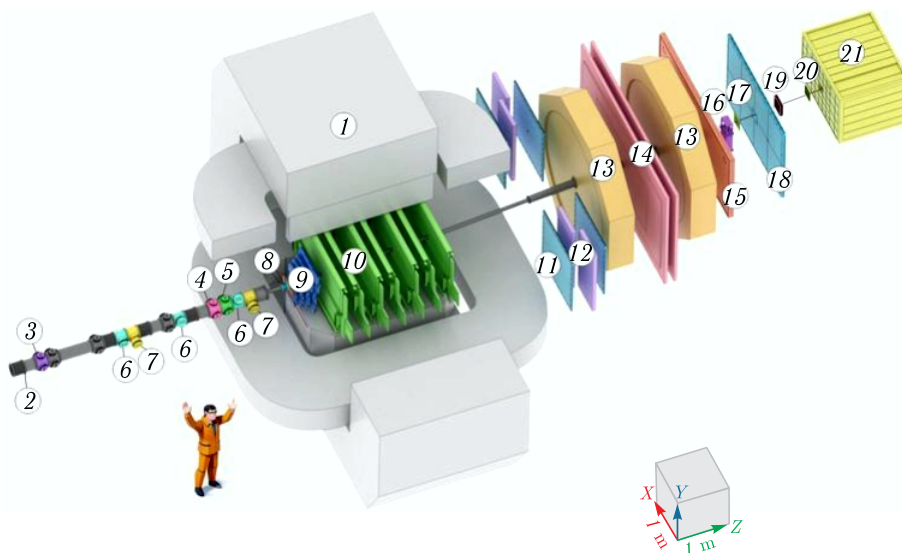


Рис. 1. Схема установки BM@N в сеансе 2023 г. с пучком Xe. Основные компоненты: 1 — анализирующий магнит SP-41; 2 — вакуумный ионопровод; 3 — пучковый счетчик BC1; 4 — счетчик вето (VC); 5 — пучковый счетчик (BC2); 6 — кремниевый трекер пучка; 7 — кремниевые профилометры пучка; 8 — детектор множественности типа «баррель» (BD) и станция мишени; 9 — передний кремниевый детектор; 10 — детекторы с газовым электронным усилением (GEM); 11 — малые катодно-стриповые камеры; 12 — времяпролетная система TOF400; 13 — дрейфовые камеры; 14 — времяпролетная система TOF700; 15 — сцинтилляционная стенка; 16 — детектор фрагментов (FD); 17 — малый детектор с газовым электронным усилением (GEM); 18 — большая катодно-стриповая камера; 19 — газовая ионизационная камера в качестве профилометра пучка; 20 — передний кварцевый годоскоп; 21 — передний адронный калориметр. В нижнем правом углу приведена система координат эксперимента BM@N. Рисунок взят из работы [3]

«Триггер минимального взаимодействия» (Minimum Bias Trigger, MBT) в дополнение к требованиям ВТ включает условие на амплитуду сигнала (A) в FD. Только в случае регистрации в FD сигнала с амплитудой меньше предустановленного порога, соответствующего прохождению иона ксенона (A_{\max}), считается, что в событии произошло взаимодействие. Логика данного триггера можно записать в виде

$$\text{MBT} = \text{BT} \times \overline{\text{FD}}(A < A_{\max}).$$

Вспомогательный триггер центральных взаимодействий (Central Collision Trigger 1, CCT1) включает пучковый триггер и сигнал из BD, генерируемый в случае, когда множественность сигналов в BD превосходит определенный порог (N):

$$\text{CCT1} = \text{BT} \times \text{BD}(> N).$$

Основной триггер центральных взаимодействий (CCT) основан на совпадении триггеров MBT и BD с условием, как для CCT1:

$$\text{CCT} = \text{MBT} \times \text{BD}(> N).$$

2. МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРИГГЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Детекторы, входящие в состав триггера ВТ, являются быстродействующими и имеют хорошую чувствительность к частицам пучка. Сигнал от иона ксенона большой, что определяется его зарядом. В данной работе оценка эффективности триггера ВТ не проводится. Она принимается равной 100 %, так как эффективность основного триггера считается для событий с выполненным триггером ВТ. Эти же события с условием триггера ВТ используются для расчета потока ионов при вычислении сечений взаимодействий.

Исследуется эффективность триггеров BD и FD. За основу взят метод, использованный при анализе данных, набранных установкой BM@N с пучком ионов аргона в 2018 г. [2].

2.1. Отбор сигналов BD и FD. Информация о срабатывании каждого из триггеров записывалась в процессе набора данных и доступна в базе данных. Однако для контроля и проверки записанных типов сработавших триггеров в представляемой работе информация о времени и амплитуде сигналов анализируется независимо.

Для BD выполняется отбор сигналов внутри интервала времени срабатывания соответствующего триггера (триггерного временного окна). Границы окна определяются по информации TDC. На рис. 2 приведен пример выбора границ триггерного окна. Ширина окна составляет 60 нс.

Для FD помимо отбора сигналов в триггерном окне (рис. 3) выполняется также отбор по амплитуде сигнала (рис. 4). Ширина триггерного окна составляет 6 каналов заряд-время-цифрового преобразователя (TQDC), что примерно соответствует 50 нс (один канал по времени TQDC соответствует 8 нс). В качестве порога сигналов от ионов ксенона выбрана середина спада распределения амплитуд сигналов перед ксенонным пиком (расположен в пределах между каналами 4500 и 6500).

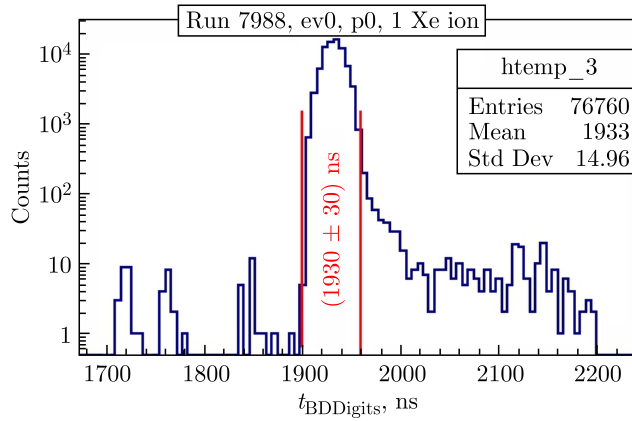


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Время сигнала в BD по информации TDC. Красными вертикальными линиями показаны границы триггерного окна

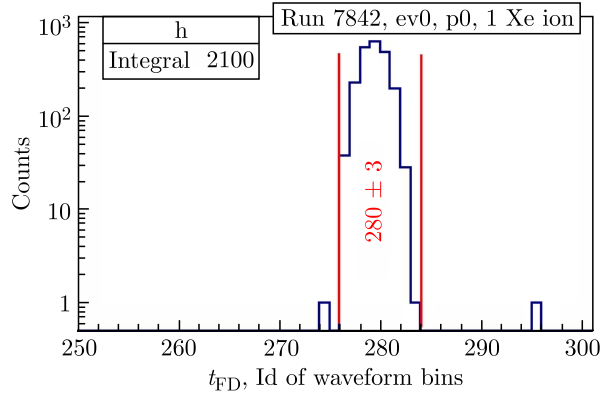


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Время сигнала в детекторе фрагментов по информации TQDC. Красными вертикальными линиями показаны границы триггерного окна

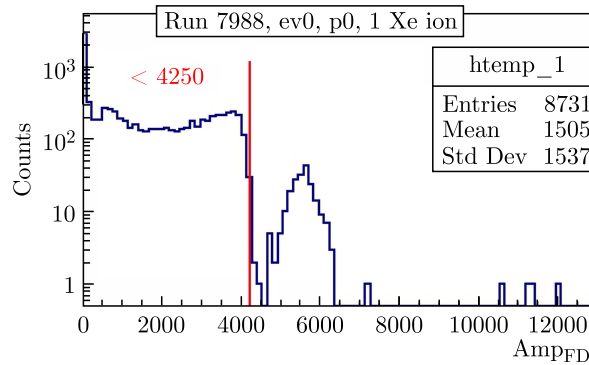


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Амплитуда сигналов в детекторе фрагментов. Красной вертикальной линией показана граница сигналов от ионов ксенона

2.2. Эффективность BD. Для каждого события накладываются условия на реконструированную первичную вершину (Primary Vertex, PV). Ниже приведен список условий на PV:

- Число треков, входящих в нее, должно быть не меньше двух.
- Положение по Z PV (рис. 5) должно отклоняться не более, чем на 1 см, от номинального положения мишени. При этом ширина распределения z_{PV} на полувысоте от максимума пика около 3 мм. Однако распределение имеет широкие негауссовы хвосты, которые объясняются неточностями алгоритма реконструкции вершины при уменьшении количества треков, а также вкладом от распадов резонансов.

Расстояние от номинального положения центра мишени до PV в плоскости XY не должно превышать 1,5 см, что соответствует радиусу мишени.

Для анализа выделяются события, набранные с триггером MBT, в который триггер BD не входит. Сигнал FD должен попадать в триггерное окно. Его амплитуда не должна превышать пороговую амплитуду для ксенонного пика.

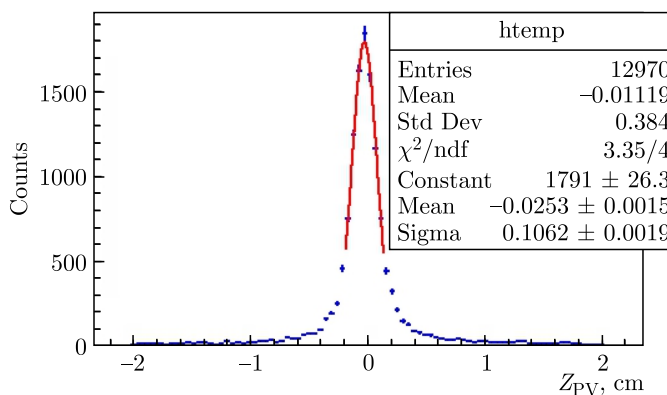


Рис. 5. Распределение координаты по оси Z реконструированной в событии первичной вершины. Кривая — аппроксимация распределения функцией Гаусса в пределах $\pm 2\sigma$ около максимального значения

При вычислении эффективности количество событий, удовлетворяющих критериям, приведенным выше, ставится в знаменатель. Для вычисления числителя на отобранные события дополнительно накладывается условие на наличие не менее четырех сигналов в триггерном окне в BD. В символьном виде эффективность выражается следующим образом:

$$\epsilon_{BD} = \frac{N(BD \geq 4 \wedge MBT)}{N(MBT)}. \quad (1)$$

2.3. Коррекция эффективности BD. Было обнаружено, что по триггерам, включающим BD, в том числе и по основному триггеру CCT, иногда записывались события с количеством сигналов в BD $N_{BD} < 4$. Для коррекции эффективности BD выполняется оценка числа таких событий. Процедура оценки следующая:

1. Подсчитываются события, набранные с триггером CCT и имеющие в триггерном окне $N_{BD} < 4$.

2. Подсчитываются события, набранные с триггером МВТ и имеющие в триггерном окне $N_{BD} = 4$ или $N_{BD} = 5$. Для нормировки использованы только ближайшие к порогу на N_{BD} бины, так как формы распределений событий по N_{BD} , набранных с триггерами МВТ и ССТ, отличались.

3. Подсчитываются события, набранные с триггером ССТ и имеющие в триггерном окне $N_{BD} = 4$ или $N_{BD} = 5$ (см. предыдущий пункт).

4. Статистика для триггера ССТ с $N_{BD} < 4$ масштабируется к статистике для МВТ. Для этого число событий, полученное на шаге 1, домножается на отношение числа событий, полученное на шаге 2, к числу из шага 3.

5. Результат шага 4 добавляется к числителю формулы (1).

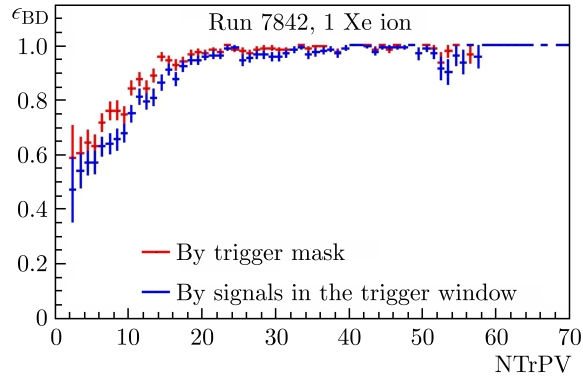


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Эффективность BD в зависимости от числа треков в первичной вершине, полученная с условием одного иона ксенона в счетчике BC1. Красным цветом обозначено распределение для событий с выставленным флагом срабатывания BD. Синим цветом обозначено ее распределение для событий, удовлетворяющих условиям из п.2.2 без коррекций на $N_{BD} < 4$

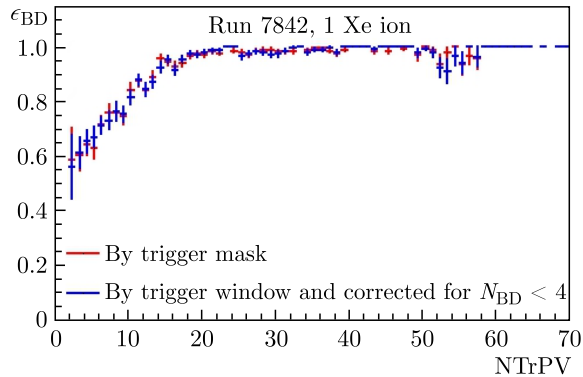


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Эффективность BD в зависимости от числа треков в первичной вершине, полученная с условием одного иона ксенона в счетчике BC1. Красным цветом обозначено распределение для событий с выставленным флагом срабатывания BD. Синим цветом обозначено распределение для событий, удовлетворяющих условиям из п.2.2 с коррекциями на $N_{BD} < 4$

На рис. 6 показано сравнение ϵ_{BD} в зависимости от числа треков в первичной вершине (NTrPV) для варианта расчета, когда числитель формулы (1) определялся на основании отметки (флага) срабатывания BD в событии, и случая, когда проверялось наличие сигнала в триггерном окне BD и коррекции на $N_{BD} < 4$ не применялись. Видно, что вычисление эффективности BD без учета коррекций занижает ее величину. После учета коррекций на $N_{BD} < 4$, как показано на рис. 7, распределения ϵ_{BD} от NTrPV согласуются в пределах статистических неопределенностей. Распределения на приведенных рисунках получены с дополнительным условием на наличие сигнала только от одного иона ксенона в пределах временного окна в 3 мкс. Такое ограничение было сделано для исключения влияния на результат наложения нескольких ионов пучка в одном событии (pile up).

2.4. Эффективность FD. При вычислении эффективности детектора фрагментов ϵ_{FD} на первичную вершину накладываются те же ограничения, что и при вычислении ϵ_{BD} . Отбираются события, записанные с триггером CCT1, в который триггер FD не входит. Проверяется наличие достаточного количества сигналов BD в триггерном окне $N_{BD} \geq 4$.

Полученное с такими условиями число $N(CCT1)$ ставится в знаменатель при вычислении ϵ_{FD} . Для вычисления числителя $N(FD \wedge CCT1)$ на отобранные события дополнительно накладывается условие на наличие сигнала в триггерном окне в FD ниже порога ксенонного пика. Формула для расчета ϵ_{FD} имеет вид

$$\epsilon_{FD} = \frac{N(FD \wedge CCT1)}{N(CCT1)}. \quad (2)$$

2.5. Подавление «pile up». Было проверено влияние на вычисление эффективности триггеров прохождения нескольких ионов пучка в пределах порядка 3 мкс около триггерного окна. На рис. 8 и 9 показаны результаты для BD и FD соответственно. Видно, что «pile up» практически не влияет на оценку эффективности BD. В то время как эффективность детектора фрагментов существенно уменьшается из-за «pile up».

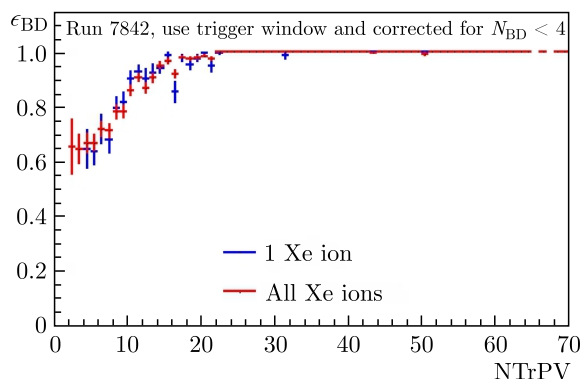


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Эффективность BD в зависимости от числа треков в первичной вершине с учетом коррекции на $N_{BD} < 4$. Красным цветом обозначено распределение для событий без подавления «pile up». Синим цветом обозначено распределение для событий с условием одного иона ксенона в счетчике BC1

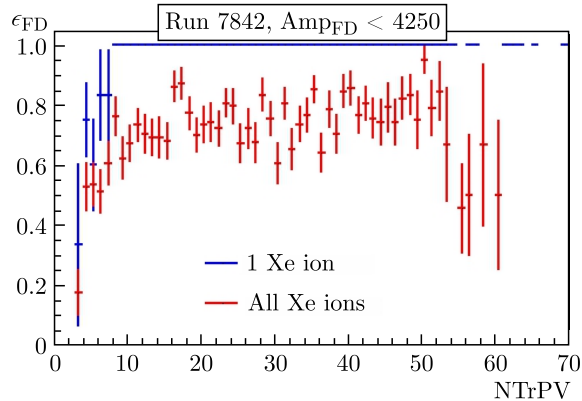


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Эффективность детектора фрагментов в зависимости от числа треков в первичной вершине. Красным цветом обозначено распределение для событий без подавления «pile up». Синим цветом обозначено распределение для событий с условием одного иона ксенона в счетчике BC1

Для удаления из анализа событий с несколькими ионами пучка первоначально использовалось требование на наличие сигнала только от одного иона ксенона в пределах 3 мкс. Из рис. 9 видно, что данное условие хорошо подавляет «pile up», и эффективность FD в оставшихся событиях при достаточно большом количестве N_{TPV} равна 100%. Однако было установлено, что использованное ограничение на BC1 сильно уменьшает статистику анализируемых событий. Данное условие отбрасывает до 80% событий.

Был выполнен поиск оптимальных критериев для подавления «pile up» и сохранения при этом максимальной статистики анализируемых событий. Установлено, что добиться баланса между достаточно высокой эффективностью FD и не очень большой потерей анализируемых событий позволяет условие на интегральный сигнал в счетчи-

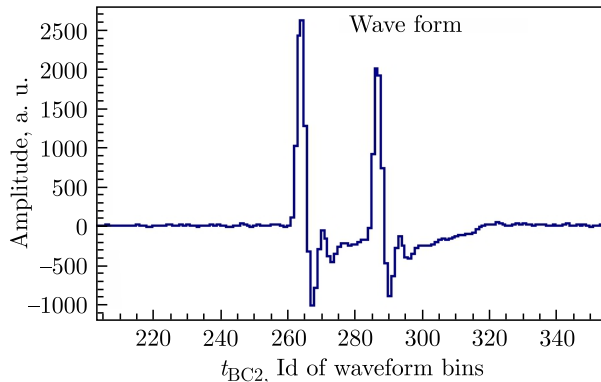


Рис. 10. Зависимость амплитуды сигнала от времени по информации TQDC счетчика BC2 для одного события с двумя близкими по времени сигналами от ионов пучка в окрестностях триггерного окна. По оси абсцисс — каналы по времени шириной 8 нс. По оси ординат — амплитуда сигнала в каждом соответствующем канале

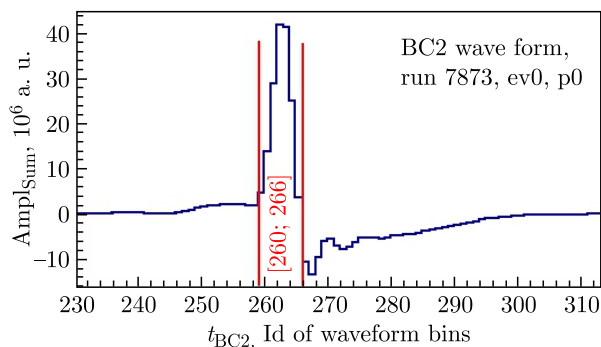


Рис. 11 (цветной в электронной версии). Зависимость суммы амплитуд сигналов от 25 000 событий от времени по информации TQDC счетчика BC2 в окрестностях триггерного окна. По оси абсцисс — каналы по времени шириной 8 нс. По оси ординат — сумма амплитуд сигналов в каждом соответствующем канале. Красными вертикальными линиями показаны границы триггерного окна для BC2

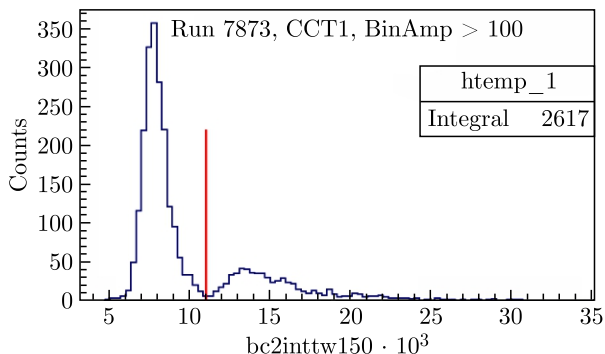


Рис. 12 (цветной в электронной версии). Распределение интегралов сигналов в пределах ± 150 нс относительно середины триггерного окна счетчика BC2 в событиях, записанных по триггеру CCT1. Красная вертикальная линия разделяет события с одним ионом пучка от событий с двумя и более ионами

ке BC2. Его преимуществом по сравнению с BC1 является то, что размер BC2 в плоскости XY соответствует размеру мишени, в то время как размер BC1 в несколько раз больше. Использование BC2 исключает лишнее уменьшение статистики анализируемых событий из-за случайных срабатываний вне области мишени.

Детектор BC2 выдает специфическую форму сигнала при прохождении через него иона. Она показана на рис. 10 и 11. На рис. 11 видна глубокая и продолжительная отрицательная фаза сигнала после основного пика. Она приводит к существенному уменьшению интеграла сигнала от второго иона, идущего близко к первому. Для уменьшения влияния на интеграл сигнала указанной отрицательной фазы при подсчете суммируются только входы в каналах с амплитудой сигнала больше 100.

На рис. 12 показано распределение интегралов сигналов, вычисленных с использованием процедуры, описанной выше, для событий, записанных по триггеру CCT1.

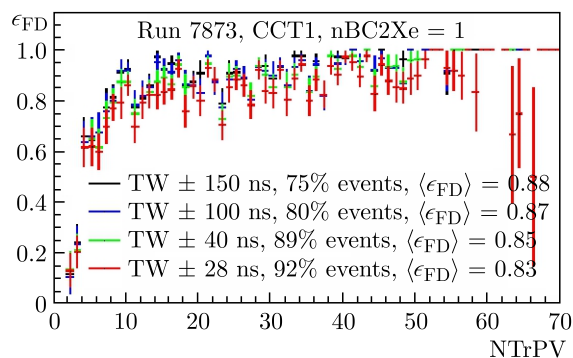


Рис. 13 (цветной в электронной версии). Эффективность детектора фрагментов в зависимости от числа треков в первичной вершине для различных диапазонов по времени для BC2, в которых определяется количество ионов пучка: черным цветом обозначено распределение 300 нс; синим — 200 нс; зеленым — 80 нс; красным — 56 нс

Видно хорошее разделение событий с одним ионом ксенона и несколькими ионами по такому интегралу.

Эффективность FD и доля сохраняемой статистики зависят от ширины временного окна интегрирования сигнала BC2, в котором оценивается количество прошедших ионов ксенона. Был выполнен поиск оптимальной ширины указанного окна. На рис. 13 для нескольких ширин окон (TW) показана ϵ_{FD} в зависимости от NTrPV. Также приведены оставшаяся статистика и полная эффективность без деления на бины по NTrPV. Исходя из представленного сравнения принято решение использовать окно шириной 80 нс, для которого доля сохраняемой статистики составляет 89 % и полная эффективность FD 85 %.

2.6. Стабильность параметров триггерных детекторов. Основной набор данных с пучком ксенона в 2023 г. занял около месяца. Триггерные детекторы подвергались интенсивному радиационному воздействию в пучке. Их выходные параметры менялись. В результате приходилось подстраивать рабочие параметры. В некоторых случаях выполнялась замена триггерного элемента.

Требуется оценка стабильности во времени параметров детекторов триггера, напрямую используемых при вычислении эффективности триггеров, а именно: триггерных окон, амплитуд и интегралов сигналов. На рис. 14 показано изменение триггерного окна BD в течение сеанса. Границы триггерного окна, полученные при первоначальном анализе по ограниченному набору данных, выделены наиболее желтым цветом. Термином «gun» называется набор данных с типичным размером от 300 тыс. до 1 млн событий. Все события, набранные в сеансе, разбиты на «gun», имеющие уникальный идентификатор (gun Id), возрастающий по времени. Из рис. 14 видно, что все сигналы лежат в пределах первоначально полученного триггерного окна для BD, т. е. триггерное окно BD не менялось на протяжении всего набора данных.

На рис. 15 и 16 продемонстрировано изменение триггерного окна FD и границы ксенонного пика по амплитуде сигнала в FD соответственно. На обоих рисунках максимальным количеством входов (наиболее желтым цветом) помечены границы, полученные при первоначальном анализе на небольшом наборе событий. Они пред-

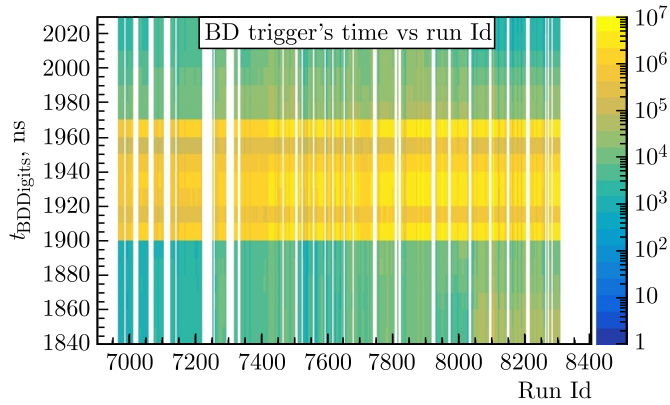


Рис. 14 (цветной в электронной версии). Стабильность триггерного окна BD по информации из TDC в зависимости от номера «гип» (детали в тексте)

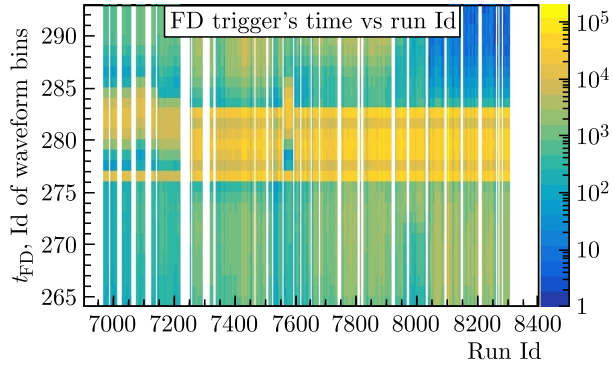


Рис. 15 (цветной в электронной версии). Стабильность триггерного окна FD по информации из TQDC в зависимости от номера «гип»

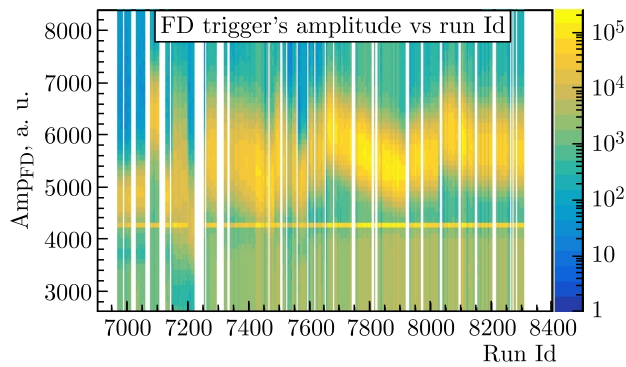


Рис. 16 (цветной в электронной версии). Стабильность амплитуды ксенонного пика в FD в зависимости от номера «гип»

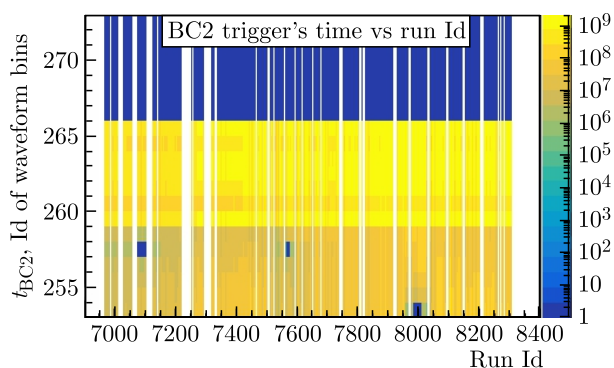


Рис. 17. Стабильность триггерного окна BC2 по информации из TQDC в зависимости от номера «гип»

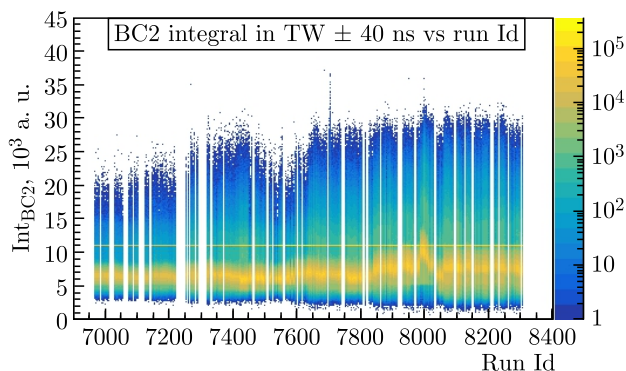


Рис. 18. Стабильность интеграла сигнала BC2 в диапазоне по времени 80 нс около середины триггерного окна в зависимости от номера «гип»

ставлены в виде горизонтальных прямых желтых полос. Из рис. 15 видно, что в «гип» в диапазоне от 6950 до 7250 и около 7575 триггерные окна отличались от первоначально установленных. Из рис. 16 видно, что граница ксенонного пика по амплитуде сигнала практически непрерывно менялась в течение всего сеанса и была как больше, так и меньше первоначально определенной. Периодически производилась корректировка усиления фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) путем изменения высокого напряжения.

Стабильность параметров счетчика BC2 приведена на рис. 17 и 18. Как и для предыдущих рисунков, показаны первоначально полученные границы. Из рис. 17 видно, что триггерное окно BC2 было стабильно все время набора данных. В то время как граница пика для одного иона пучка по интегралу сигнала в BC2 менялась, что демонстрирует рис. 18.

В дальнейшем расчете эффективности триггеров учтены все изменения параметров триггерных детекторов, приведенные выше.

2.7. Стабильность эффективности триггеров. Изменения условий проведения эксперимента, в том числе параметров триггерных детекторов, приводят со временем

к изменению эффективности триггера. Выше было показано, что параметры BD были заметно стабильнее параметров FD в сеансе. В результате анализа распределений эффективностей триггеров в зависимости от NTGrPV для различных «гип» для BD было выделено 13 диапазонов «гип», а для FD — 62 диапазона, для каждого из которых строилось общее распределение ϵ от NTGrPV. Разбиение делалось таким образом, чтобы статистическая погрешность в каждом бине по NTGrPV не превышала 5%. Для BD из-за объединения большего объема статистики эта величина около 1%.

Рис. 19–22 демонстрируют диапазон изменений эффективности триггеров BD и FD в течение сеанса. На рис. 19 показана полная эффективность BD по сформированным бинам. Значения расположены около 95%. Их разброс не превышает 5%. Заметна небольшая деградация эффективности со временем вплоть до «гип» около 8000. После чего ϵ_{BD} была восстановлена. Пределы изменений эффективности BD в зависимости от NTGrPV для двух интервалов «гип» из области наибольшей и наименьшей полной эффективности представлены на рис. 20. Видно, что основные отличия наблюдаются в области значений NTGrPV до 20, которые соответствуют периферическим столкновениям. Существенное уменьшение ϵ_{BD} для периферических столкновений связано с уменьшением вероятности попадания в акцептанс BD (покрывает угол θ

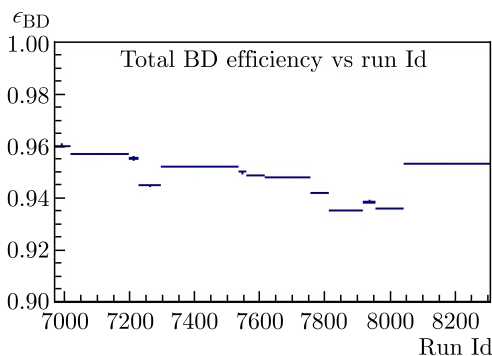


Рис. 19. Полная эффективность BD в зависимости от интервала «гип»

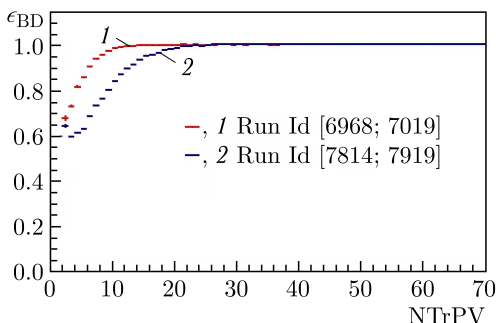


Рис. 20 (цветной в электронной версии). Эффективность BD в зависимости от числа треков в первичной вершине для двух интервалов номеров «гип»: красным цветом обозначено распределение для интервала [6968; 7019]; синим цветом обозначено распределение для интервала [7814; 7919]

относительно оси Z примерно от 52 до 157°) количества частиц, достаточного для срабатывания триггера. Максимальная разница достигает 25% . После NTrPV около 20 оба распределения выходят на плато с ϵ_{BD} , близкой к 100% .

На рис. 21 представлена полная эффективность FD в зависимости от интервала номеров «гип». Среднее значение расположено около 90% , а разброс значений составляет около 15% , что заметно выше, чем для BD. При этом распределение имеет волнообразную форму с несколькими периодами деградации и восстановления эффективности. Характер изменения ϵ_{FD} объясняется влиянием нескольких факторов. Усиление ФЭУ FD подстраивалось в течение сеанса. Разные временные задержки в схемах совпадений для триггеров CCT1 и MBT в совокупности с наличием «pile up» приводили к дополнительному уменьшению оцениваемого значения ϵ_{FD} и не приводили к такому уменьшению при оценке ϵ_{BD} . Указанное уменьшение связано с интенсивностью пучка и структурой пучка в виде групп ионов (спаек) вместо их равномерного распределения и, как следствие, с величиной «pile up». По аналогии с BD (см. рис. 20) для FD представлен максимальный разброс ϵ_{FD} в зависимости от NTrPV на рис. 22. Наибольшие отличия наблюдаются для периферических столкновений с малыми значениями NTrPV (ниже 10) и достигают 40% . Снижение ϵ_{FD} для периферических столкновений происходит из-за того, что в них в большом чис-

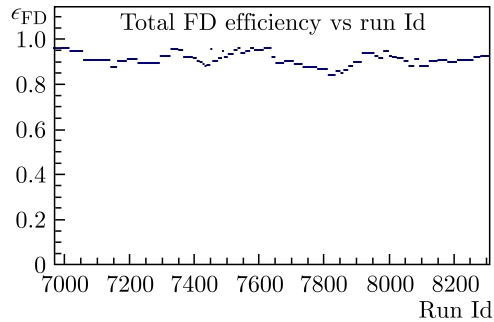


Рис. 21. Полная эффективность детектора фрагментов в зависимости от интервала «гип»

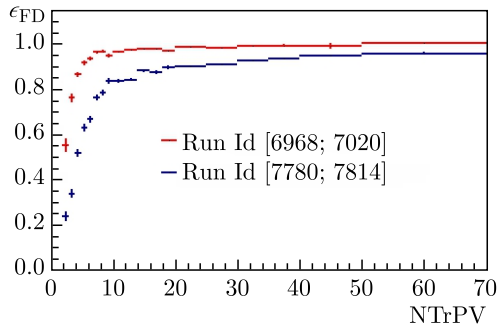


Рис. 22 (цветной в электронной версии). Эффективность детектора фрагментов в зависимости от числа треков в первичной вершине для двух интервалов номеров «гип»: красным цветом обозначено распределение для интервала $[6968; 7020]$; синим цветом обозначено распределение для интервала $[7780; 7814]$

ле случаев не происходит развала ядра ксенона, в результате чего триггер FD не срабатывает. Для обоих распределений наблюдается быстрый выход на плато при значениях NTGrPV ниже 10, т. е. значительно быстрее, чем в случае BD. Это связано с различиями в работе детекторов. Видно, что в отличие от BD величина ϵ_{FD} на плато разная и в обоих случаях ниже 100%. Максимальное значение ϵ_{FD} на плато составляет примерно 95%, минимальное — 85–90%. Причем для обоих интервалов «gip», особенно для последнего, наблюдается заметный непрерывный рост с NTGrPV.

Существенно более низкая оценка эффективности FD по сравнению с BD объясняется влиянием «pile up» на оценку для FD и отсутствием или существенно меньшей величиной его влияния для BD. Выработанный критерий для BC2 на подавление «pile up» существенно уменьшил его влияние, однако не устранил полностью. Эффективность критерия для BC2 зависит от периода «gip», который характеризуется интенсивностью и структурой пучка.

2.8. Эффективность основного триггера. Эффективность основного триггера CCT вычисляется в предположении независимости эффективностей триггеров BD и FD по формуле

$$\epsilon_{CCT} = \epsilon_{BD}\epsilon_{FD}. \quad (3)$$

Полная по всему сеансу с пучком ионов ксенона эффективность CCT в зависимости от количества треков в первичной вершине представлена на рис. 23. Она выходит на плато 90–95% после NTGrPV больше 15. Для наиболее периферических столкновений ϵ_{CCT} падает до 20%. Причины падения ϵ_{CCT} связаны с уменьшением ϵ_{BD} и ϵ_{FD} для периферических столкновений и обсуждались в п. 2.7.

Важным вопросом в процессе анализа данных является влияние эффективности триггера на отбор событий по центральности столкновения. В свою очередь, величина центральности столкновения напрямую связана с параметром столкновения, или, другими словами, прицельным параметром. Для требуемой оценки была использована модель ядро-ядерных столкновений DCM-SMM [4] и программа GEANT3. Моделированные события анализировались через ту же цепочку реконструкции и идентификации, что и экспериментальные события.

Распределения параметра столкновений, показанные на рис. 24, построены для событий с реконструированной первичной вершиной, включающей два и более трека,

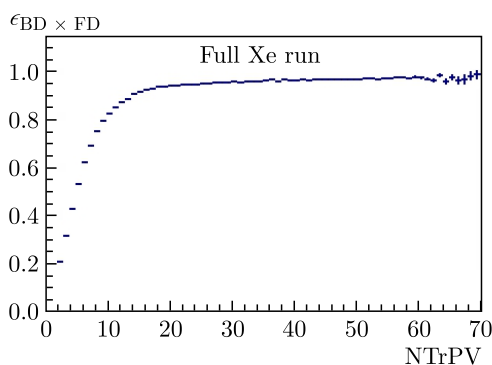


Рис. 23. Полная эффективность триггера CCT в зависимости от числа треков в первичной вершине для всего ксенонного сеанса

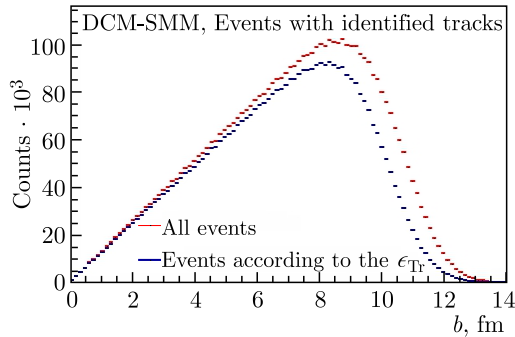


Рис. 24 (цветной в электронной версии). Распределение моделированных событий с реконструированной первичной вершиной и идентифицированными треками по параметру столкновения. Красным цветом обозначено распределение для событий без учета ϵ_{CCT} , синим — с учетом ϵ_{CCT}

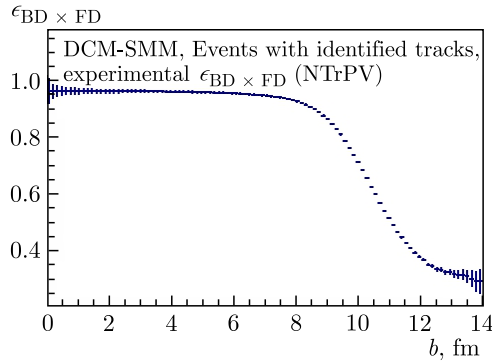


Рис. 25. Зависимость эффективности триггера CCT от параметра столкновения для моделированных событий

и идентифицированными во времяпролетной системе треками. На рис. 24 распределение, обозначенное красным цветом, не учитывает эффективность CCT. Распределение, обозначенное синим цветом, построено с использованием зависимости ϵ_{CCT} от NTrPV, полученной для экспериментальных данных. Видно, что эффективность триггера оказывает наибольшее влияние на периферические события с большими прицельными параметрами.

На рис. 25 представлена зависимость эффективности основного триггера от параметра столкновения, построенная путем деления показаний синей гистограммы (из рис. 24) на показания красной. На распределении видно плато для центральных и полужентральных параметров столкновений. Спад начинается около 9 фм.

3. ОЦЕНКА СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ТРИГГЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Систематическая погрешность посчитана на основе ограниченного набора данных, набранных с триггером ВТ. При этом использованы события, где на уровне логики триггера требовалось отсутствие дополнительных ионов пучка в определенных интер-

валах по времени до прихода иона, вызвавшего срабатывание триггера, и после (так называемая «Before/After protection»). Указанные временные интервалы «Before/After protection» для триггера ВТ соответствуют аналогичным интервалам для триггера МВТ, включенного в основной триггер взаимодействий ССТ.

В качестве оценки систематической погрешности эффективности основного триггера использовано абсолютное значение следующего выражения:

$$\Delta\epsilon_{\text{ССТ}} = \frac{N(\text{BD} \geq 4 \wedge \text{FD} \wedge \text{BT})}{N(\text{BT})} - \frac{N(\text{BD} \geq 4 \wedge \text{MBT})}{N(\text{MBT})} \frac{N(\text{FD} \wedge \text{ССТ1})}{N(\text{ССТ1})}, \quad (4)$$

где $N(\text{BT})$ — число событий, набранных с триггером ВТ; $N(\text{BD} \geq 4 \wedge \text{FD} \wedge \text{BT})$ — число событий, набранных с условием одновременного срабатывания триггеров ВД, FD и ВТ, остальные обозначения соответствуют обозначениям для выражений (1) и (2).

В первой части сеанса с пучком ионов ксенона использовались настройки с защитой от дополнительных ионов в пределах 0,8 мкс до триггерного иона и 0,4 мкс после.

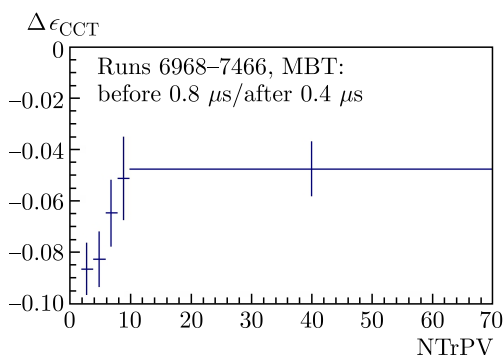


Рис. 26. Оценка систематической неопределенности эффективности ССТ с учетом знака в зависимости от числа треков в первичной вершине для интервала номеров «гип» от 6968 до 7466 с настройками защиты от «pile up» 0,8 мкс до триггерного сигнала и 0,4 мкс после триггерного сигнала

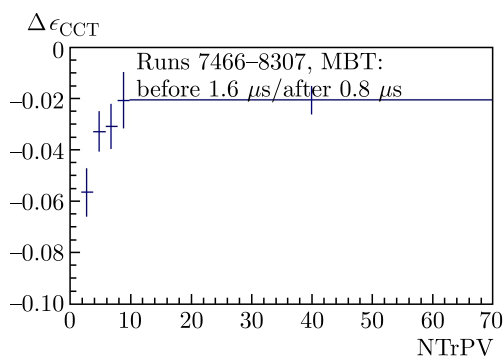


Рис. 27. Оценка систематической неопределенности эффективности ССТ с учетом знака в зависимости от числа треков в первичной вершине для интервала номеров «гип» от 7466 до 8307 с настройками защиты от «pile up» 1,6 мкс до триггерного сигнала и 0,8 мкс после триггерного сигнала

Во второй части временные окна защиты от «pile up» были увеличены до 1,6 мкс до триггерного иона и 0,8 мкс после него. Распределения для $\Delta\epsilon_{\text{CCT}}$ в зависимости от NTrPV представлены на рис. 26 и 27 для указанных двух периодов набора данных с разными настройками «Before/After protection». Для каждого периода систематические погрешности для основного числа бинов по числу треков в первичной вершине ($\text{NTrPV} > 10$) в пределах необределенностей совпадают. Для первого периода, когда временные окна защиты от «pile up» были в два раза уже, $|\Delta\epsilon_{\text{CCT}}|$ примерно в два раза больше, чем для второго периода. При уменьшении NTrPV ниже 10 абсолютное значение $\Delta\epsilon_{\text{CCT}}$ заметно возрастает. При этом наблюдается более медленное возрастание для первого периода, чем для второго.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика оценки эффективности основного триггера, а также ее систематической погрешности в сеансе с пучком ионов ксенона эксперимента *BM@N*, проведенном в 2023 г. Определен набор данных для анализа и критерии отбора событий. Получена зависимость указанной эффективности от количества треков в первичной вершине и того временного интервала, в течение которого данные были набраны.

Показано, что важным фактором, влияющим на эффективность триггера, является наложение нескольких пучковых частиц в одном событии, записанном системой сбора данных. Найден эффективный способ фильтрации событий, эффективность триггера в которых искажена в результате «pile up». Для этого используется информация пучкового счетчика BC2.

Проведен анализ работы ключевых триггерных детекторов в течение всего сеанса. Результаты анализа учтены при оценке эффективности основного триггера.

Полученная эффективность триггера позволяет согласовать физические результаты анализа данных эксперимента *BM@N* с результатами других экспериментов, а также с предсказаниями теоретических моделей.

В пакет программного обеспечения для анализа данных эксперимента *BM@N* BmnRoot [5] добавлен интерфейс для получения значения эффективности для конкретного временного интервала набора данных и количества треков в первичной вершине в виде класса BmnTriggerEfficiencyRun8. Дополнительно интерфейс позволяет выбирать события, подходящие для анализа. В результате применения критериев отбора событий доля отбрасываемых событий варьируется от 0,5 до 6 %. В качестве примера использования интерфейса в BmnRoot добавлен скрипт CheckTriggerEfficiencyInterfaceRun8.C.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Объединенного института ядерных исследований. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Благодарности. Авторы выражают благодарность С. В. Афанасьеву и М. В. Завертьеву за ценные замечания и комментарии, сделанные при подготовке данной работы к публикации.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M. et al. (BM@N Collab.)*. Studies of Baryonic Matter at the BM@N Experiment (JINR) // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52, No. 8. P. 213.
2. *Afanasiev S. et al. (BM@N Collab.)*. Production of π^+ and K^+ Mesons in Argon–Nucleus Interactions at 3.2A GeV // JHEP. 2023. V. 07. P. 174.
3. *Afanasiev S. et al. (BM@N Collab.)*. The BM@N Spectrometer at the NICA Accelerator Complex // Nucl. Instr. Meth. A. 2024. V. 1065. P. 169532.
4. *Baznat M., Botvina A., Musulmanbekov G., Toneev V., Zhezher V.* Monte Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 3. P. 303–324.
5. <https://git.jinr.ru/nica/bmnroot>

Получено 23 июня 2025 г.