

ISSN 1561-2430 (Print)
 ISSN 2524-2415 (Online)
 УДК 539.1
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-4-317-326>

Поступила в редакцию 13.11.2024
 Received 13.11.2024

Д. В. Шёлковий¹, С. Н. Гаркуша¹, А. О. Горковенко^{2,3}, Д. Н. Григорьев^{2,4}

¹Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
 Минск, Республика Беларусь

²Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,
 Новосибирск, Российская Федерация

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

⁴Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА НОВОГО АЛГОРИТМА НЕЙТРАЛЬНОГО ТРИГГЕРА ДЕТЕКТОРА КМД-3

Аннотация. С целью улучшения энергетического и координатного разрешения нейтрального триггера детектора КМД-3 предлагается использовать алгоритм кластеризации на основе перекрывающихся «окон» триггерных ячеек. В качестве базовой триггерной ячейки рассматривается состоящая из 2×2 кристаллов область, значение суммарной амплитуды сигнала в которой передается для обработки в триггерную систему. На основе моделирования методом Монте-Карло определено оптимальное количество триггерных ячеек, которые должны быть отнесены к кластеру для восстановления энергии попавших в калориметр частиц в режиме реального времени.

Ключевые слова: физика элементарных частиц, нейтральный триггер, триггерная ячейка, эффективность запуска, детектор КМД-3

Для цитирования. Разработка нового алгоритма нейтрального триггера детектора КМД-3 / Д. В. Шёлковий [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2024. – Т. 60, № 4. – С. 317–326. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-4-317-326>

Dzmitry V. Shoukavy¹, Siarhei N. Harkusha¹, Anton O. Gorkovenko^{2,3}, Dmitry N. Grigoriev^{2,3}

¹B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
 Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

DEVELOPMENT OF A NEW ALGORITHM FOR THE NEUTRAL TRIGGER OF THE CMD-3

Abstract. In order to improve the energy and coordinate resolution of the neutral trigger of the CMD-3 detector, it is proposed to use a clustering algorithm based on overlapping “windows” of trigger cells. The window of 2×2 crystals is considered to be a single trigger cell, and its signal amplitude value is sent for processing by the trigger system. Based on Monte-Carlo simulation, the optimal number of trigger cells to assign to the cluster for energy reconstruction of particles hitting the calorimeter in real time was determined.

Keywords: elementary particle physics, neutral trigger, trigger cell, trigger efficiency, detector CMD-3

For citation. Shoukavy Dz. V., Harkusha S. N., Gorkovenko A. O., Grigoriev D. N. Development of a new algorithm for the neutral trigger of the CMD-3. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 317–326 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-4-317-326>

Введение. В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН проводятся эксперименты с криогенным магнитным детектором (КМД-3) на электрон-позитронном ускорительном комплексе ВЭПП-200 [1]. Данный комплекс имеет проектную светимость $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и энергию пучков до 2 ГэВ в системе центра масс.

Основной физической задачей детектора КМД-3 является изучение физики адронов в секторе легких кварков и прецизионное измерение эксклюзивных адронных сечений в диапазоне энергий коллайдера ВЭПП-2000. Прецизионные данные по адронным сечениям необходимы для использования во многих приложениях, в частности для расчета адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона (АММ), $a_\mu = (g - 2)_\mu/2$ в рамках Стандартной модели. С целью

достоверного сравнения теории с экспериментальными данными требуется достигнуть высокой точности расчета АММ мюона.

В Стандартной модели АММ мюона состоит из трех слагаемых:

$$a_{\mu}^{\text{SM}} = a_{\mu}^{\text{QED}} + a_{\mu}^{\text{EV}} + a_{\mu}^{\text{had}}, \quad (1)$$

где a_{μ}^{QED} , a_{μ}^{EV} , a_{μ}^{had} – вклады от электромагнитного, электрослабого и адронного секторов соответственно.

Для электромагнитного и слабого взаимодействия использование метода теории возмущений благодаря малости констант связи позволяет рассчитать вклады a_{μ}^{QED} , a_{μ}^{EV} в АММ мюона с требуемой точностью. В то же время основная часть адронного вклада a_{μ}^{had} рассчитывается путем интегрирования экспериментального полного сечения рождения адронов при аннигиляции электрона и позитрона при низких энергиях, поскольку эти сечения могут быть вычислены исходя из первых принципов в рамках квантовой хромодинамики с требуемой точностью только при высоких энергиях, относительный вклад которых невелик.

Эксперимент Muon $g - 2$, проводимый в Национальной ускорительной лаборатории (FNAL, США), после обработки экспериментальных данных, набранных в 2019 и 2020 гг., определил, что результат измерения АММ мюона расходится с предсказаниями Стандартной модели со статистической значимостью до $5,0 \sigma$ [2]. Однако опубликованные недавно данные эксперимента КМД-3 по измерению сечения аннигиляции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ существенно корректируют величину нормированного полного сечения рождения адронов и основанное на нем теоретическое значение a_{μ}^{had} в сторону согласия с экспериментальным значением в пределах $0,9$ стандартных отклонений [3]. Это противоречие требует решения, что ведет к необходимости уменьшить погрешности в прецизионных экспериментах по измерению адронных сечений.

Коллайдер ВЭПП-2000 – единственный в мире, который в данный момент работает с высокой светимостью в области энергий ниже 2 ГэВ, обеспечивающей измерение основного вклад (92 %) в a_{μ}^{had} и определяющей точность вычисления этой величины.

Увеличение светимости коллайдера ВЭПП-2000 спровоцировало проблему роста загрузки триггерной системы. В результате появилось значительное мертвое время, что привело к потере физических данных, а наложение сигналов – к увеличению фоновой загрузки. Все это отрицательно влияет на работу детектора. Единственный выход из этой ситуации – обновить триггерную систему, что повысит производительность, сократит время принятия решений и увеличит объем обрабатываемых данных. В результате разработка и создание новой электроники с модернизацией нейтрального триггера детектора КМД-3 позволит уменьшить систематические ошибки при измерениях и, соответственно, улучшить точность измерения многих адронных сечений.

Триггерная система детектора КМД-3. Сбор данных и мониторинг состояний подсистем детектора КМД-3 осуществляется с помощью системы сбора данных (ССД). Отбор событий, которые необходимо регистрировать, производит триггерная система (триггер). В случае детектора КМД-3 она состоит из «нейтрального» триггера, который производит отбор на основании информации из калориметров, и «заряженного» триггера, использующего информацию с дрейфовой камеры. Оба этих триггера могут запустить цикл оцифровки всех детекторных систем.

Текущее событие записывается на жесткий диск, если пришло любое положительное решение триггера. Перекрестная проверка срабатывания двух независимых триггеров дает возможность определять их эффективность при обработке экспериментальных данных.

Нейтральный триггер анализирует сигналы от калориметрической системы, состоящей из цилиндрического калориметра на основе жидкого ксенона LXe и кристаллов CsI, а также торцевого калориметра на основе кристаллов BGO. Калориметрическая система разбита на так называемые супербашни, которые формируются из групп CsI, BGO и LXe. Всего получается 16 супербашен по полярному углу φ и 5 по координате Z (рис. 1).

Сигналы с каждого из калориметров суммируются по супербашням в блоках усилителей-формирователей-оцифровщиков (УФО) и передаются в блоки амплитудных дискриминаторов и сумматоров (АДИС), которые отфильтровывают сигналы малой амплитуды. Блоки АДИС

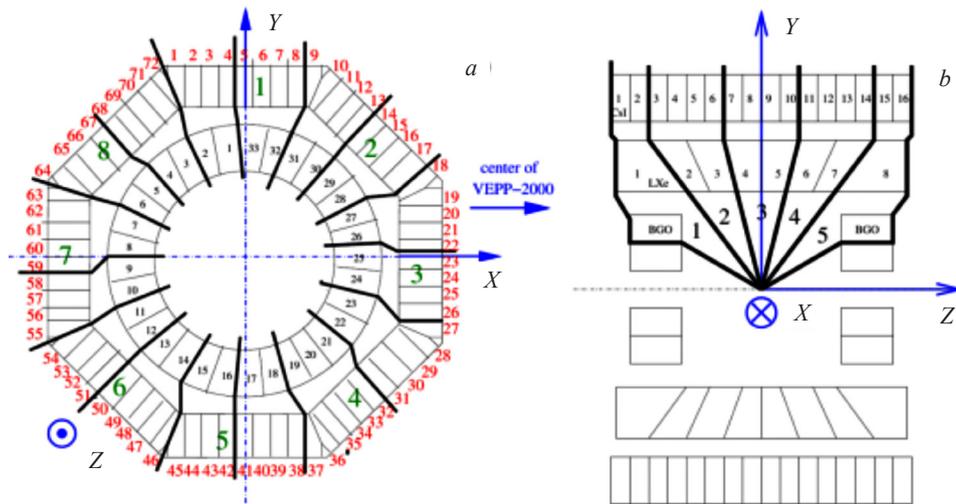


Рис. 1. Схема разбиения калориметра на 80 триггерных супербашен: 16 секторов в $(R-\varphi)$ -плоскости (a); 5 секторов в $(R-Z)$ -плоскости (b)

Fig. 1. Scheme of dividing the calorimeter into 80 trigger supertowers: 16 sectors in the $(R-\varphi)$ -plane (a); 5 sectors in the $(R-Z)$ -plane (b)

передают логическую информацию о группах, в которых предположительно была зарегистрирована частица, и суммарное энерговыделение во всех таких группах в основной блок нейтрального триггера, так называемый кластер-файндер (КФ), предназначенный для отбора полезных событий. Отобранное полезное событие поступает в модуль частот и синхронизации (МЧС), который на основании этого сигнала либо сигнала трек-файндера (блок из заряженного триггера) передает стартовый сигнал для системы сбора данных (ССД).

Функциональную схему новой электроники КМД-3 можно разделить на 3 группы: триггерную, измерительную и служебную (рис. 2).

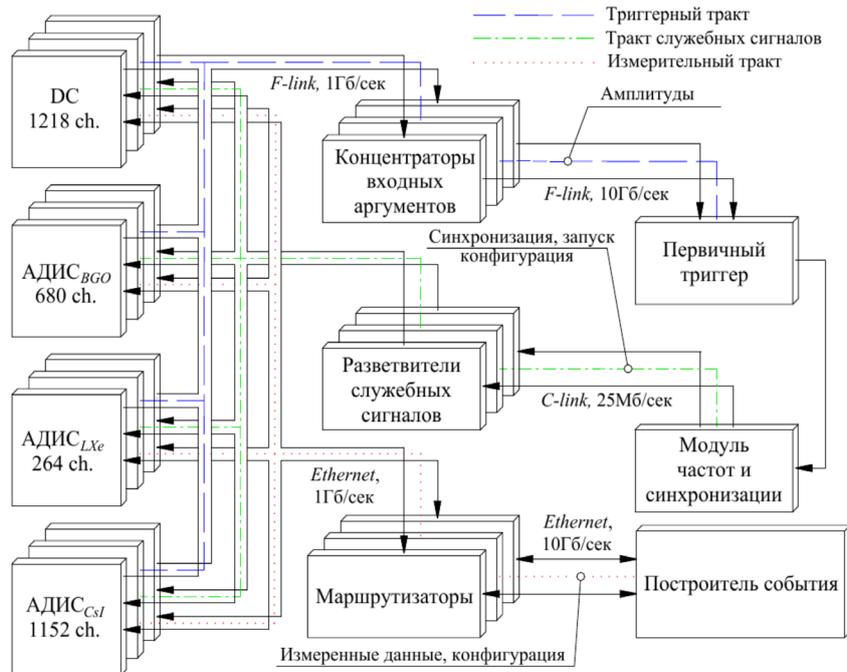


Рис. 2. Структурная схема новой электроники детектора КМД-3

Fig. 2. Structural diagram of new electronics for the CMD-3 detector

Новый алгоритм работы нейтрального триггера КМД-3. Одной из целей модернизации триггерной системы детектора КМД-3 является оптимизация алгоритма поиска близких кластеров в электромагнитных калориметрах. Новый алгоритм должен обеспечить улучшение энергетического разрешения, уменьшение времени работы триггерной системы наряду с высокой эффективностью запуска на уровне 99 %. Дополнительным требованием является улучшение координатного разрешения (разделение фотонных кластеров), что позволит изучать полностью нейтральные события с большим количеством частиц в конечном состоянии. Для решения этих задач мы предлагаем использовать алгоритм кластеризации на основе перекрывающихся «окон» суммирования триггерных ячеек. Размер «окна» выбирается равным типичному размеру кластера, сформированному из триггерных ячеек. Данный подход реализован для построения триггерной системы эксперимента СОМЕТ и обеспечил энергетическое разрешение в режиме реального времени ($\sigma_E/E = 4,5\%$ для электронов с энергией 105 МэВ), практически одинаковое с разрешением, полученным при последующем офлайн-анализе [4, 5].

С целью уменьшения объема информации, обрабатываемой триггерной системой, в качестве аргументов планируется использовать значение амплитуды сигнала в так называемой триггерной ячейке. В случае калориметров на основе кристаллов CsI (цилиндрический) и BGO (торцевой) триггерная ячейка состоит из 2×2 кристаллов. Сигналы всех каналов внутри триггерной ячейки суммируются аналоговым сумматором, и таким образом получаемый групповой сигнал является сигналом триггерной ячейки. Для калориметра на основе жидкого ксенона триггерной ячейкой будет одна башня.

Электромагнитный ливень, вызванный попадающей частицей, будет распределяться по многим кристаллам калориметра. Для восстановления полной энергии частицы в режиме реального времени необходимо просуммировать энерговыделение в триггерных ячейках калориметра. Поэтому важно выбрать оптимальное количество триггерных ячеек, которые должны быть отнесены к кластеру для восстановления энергии попавших в калориметр частиц.

В статье рассматриваются 2 размера кластера:

- из 2×2 триггерных ячеек, соответствующий 16 кристаллам;
- из 3×3 триггерных ячеек, соответствующий 36 кристаллам.

Алгоритм работает следующим образом. На каждом обороте пучка в каждом «окне» триггерных ячеек вычисляется суммарное энерговыделение. Для случая с размером «окна» 2×2 кластер выбирается так: сначала происходит суммирование по всем возможным комбинациям триггерных ячеек размером 2×2 ; затем находится максимальная триггерная сумма, которая в итоге и принимается за сработавший кластер. В случае с размером кластера из 3×3 триггерных ячеек поиск кластера происходит аналогично случаю 2×2 с единственной разницей в том, что суммирование осуществляется по всем возможным комбинациям «окон» из 3×3 триггерных ячеек.

Результаты моделирования. Моделирование было выполнено с использованием официального программного обеспечения эксперимента КМД-3 – Cmd3Sim, созданного на основе инструментария Geant4. Пакет Cmd3Sim содержит детальное описание всех систем детектора КМД-3 и обеспечивает полное моделирование детектора.

Для отработки выбора размера кластера используется только торцевой калориметр, предназначенный для регистрации частиц с полярными углами вылета от 16° до 49° и от 131° до 164° , что составляет телесный угол $0,3 \cdot 4\pi$ ср. Он состоит из двух одинаковых торцов по 340 кристаллов ортогерманата висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) в каждом. Выбор торцевого калориметра для проведения исследования обусловлен тем, что он расположен близко к пучкам и поэтому наиболее загружен фоновыми частицами. На рис. 3 приведена текущая нумерация каналов (кристаллов) одного из торца калориметра и предлагаемое разбиение на триггерные ячейки. На цветном фоне приведена нумерация триггерных ячеек, применяемая в моделировании. Для моделирования использовались следующие входные параметры: начальная частица – фотон; начальная энергия – от 30 до 600 МэВ; количество начальных событий – 10 тыс.; начальное положение – $(0, 0, 0)$; полярный угол – $27^\circ < \theta < 34^\circ$; азимутальный угол – $85^\circ < \phi < 95^\circ$. Ограничение по углам выбрано так, чтобы фотон попадал в центральную часть торцевого калориметра, а именно в область, выделенную на рис. 3 красным квадратом.

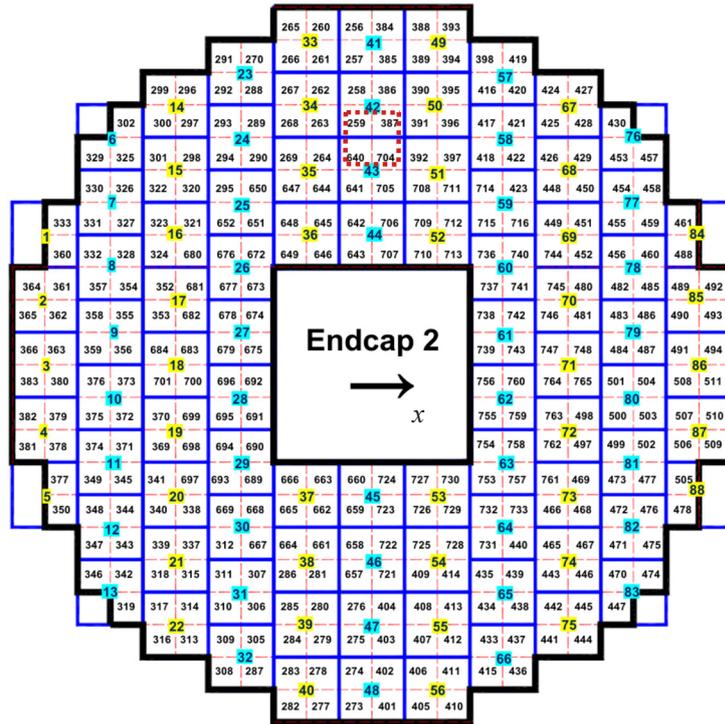


Рис. 3. Предлагаемая схема разбиения торцевого калориметра ВГО на единичные триггерные ячейки. На желтом и бирюзовом фоне приведена нумерация единичных триггерных ячеек

Fig. 3. Proposed scheme for dividing the BGO endcap calorimeter into single trigger cells. The single trigger cell numbers are shown on the yellow and turquoise background

На рис. 4, *a* – 9, *a* показано распределение энерговыделения для триггерной ячейки и кластеров разных размеров в зависимости от энергии фотонов в диапазоне от 30 до 600 МэВ. Рис. 4, *b* – 9, *b* соответствуют количеству сработавших кристаллов $N_{\text{ср}}$ калориметра в событии. Кристаллы считаются сработавшими, если энерговыделение в них превышает пороговое значение, равное 4 МэВ. Помимо рассматриваемых размеров кластера для сравнения добавлена информация о энерговыделении в триггерной ячейке и в целом калориметре (см. рис. 4–9). В качестве триггерной ячейки здесь рассматривается ячейка с максимальным энерговыделением в событии. Как видно, для энергий фотона меньше 100 МэВ разница в спектре энерговыделения для кластеров из 2×2 и 3×3 триггерных ячеек незначительна.

Для обоих размеров кластера проводилась оценка энергетического разрешения калориметра в режиме реального времени. Стоит отметить, что так как моделирование выполнялось в узком диапазоне полярного и азимутального углов, то краевые эффекты и поперечные утечки электромагнитного ливня отсутствуют. Дополнительно в моделировании не учитывался электронный шум. Энергетический эквивалент шума в сигналах триггерных ячеек зависит от режимов работы калориметра и варьируется от 0,4 до 1 МэВ на кристалл, что будет приводить к более значительному ухудшению энергетического разрешения для кластера большого размера. Поэтому данная оценка не является полностью реалистичной, но дает представление о характере поведения энергетического разрешения калориметра в режиме реального времени. Для определения энергетического разрешения полученные из моделирования энергетические спектры, представленные на рис. 4–9, аппроксимируются с помощью логарифмической функции Гаусса

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}, \quad (2)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение, μ – среднее значение.

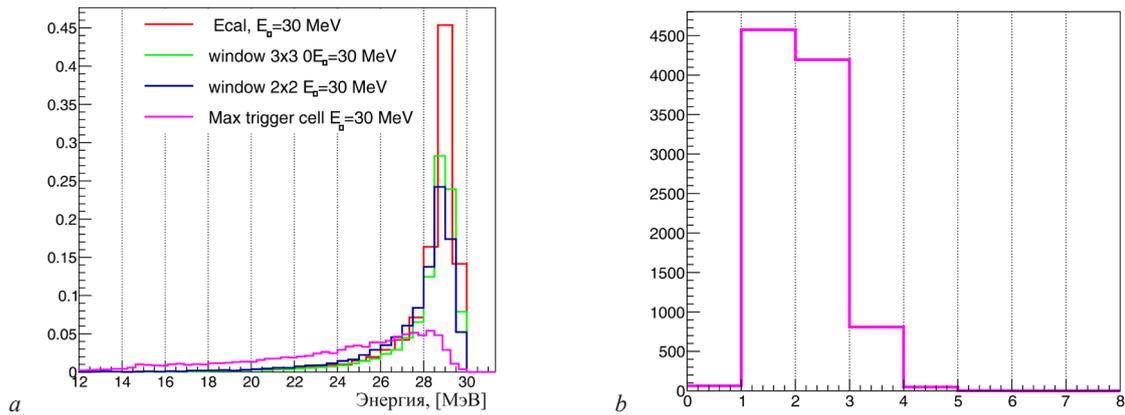


Рис. 4. Спектр энерговыведения в кластерах разных размеров для фотонов с энергией 30 МэВ: триггерная ячейка (фиолетовая линия), кластер из 2×2 триггерных ячеек (синяя линия), кластер из 3×3 триггерных ячеек (зеленая линия), калориметр (красная линия) (a); число сработавших кристаллов N_{cr} калориметра в событие для $E_\gamma = 30$ МэВ (b)

Fig. 4. The spectra of the deposited energy in clusters of different sizes for photons with the energy of 30 MeV: trigger cell (purple line), cluster of 2×2 trigger cells (blue line), cluster of 3×3 trigger cells (green line), calorimeter (red line) (a); number of calorimeter crystals triggered N_{tr} in an event for $E_\gamma = 30$ MeV (b)

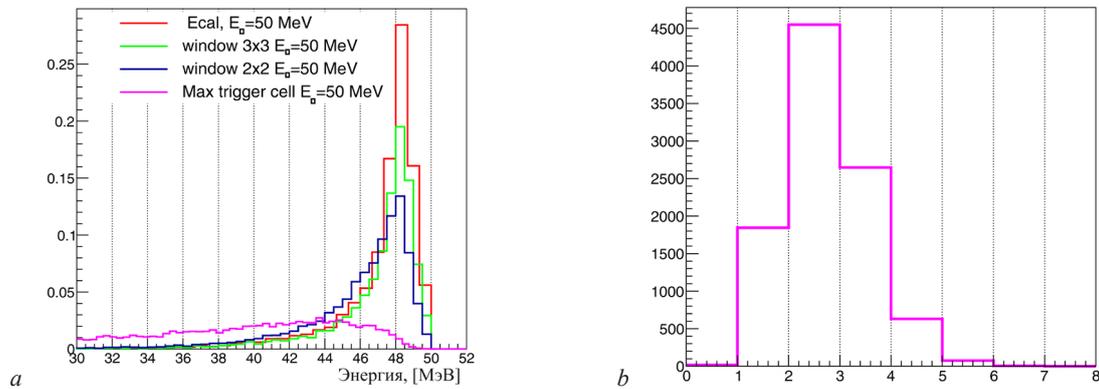


Рис. 5. Спектр энерговыведения в кластерах разных размеров для фотонов с энергией 50 МэВ: триггерная ячейка (фиолетовая линия), кластер из 2×2 триггерных ячеек (синяя линия), кластер из 3×3 триггерных ячеек (зеленая линия), калориметр (красная линия) (a); число сработавших кристаллов N_{cr} калориметра в событие для $E_\gamma = 50$ МэВ (b)

Fig. 5. The spectra of the deposited energy in clusters of different sizes for photons with the energy of 50 MeV: trigger cell (purple line), cluster of 2×2 trigger cells (blue line), cluster of 3×3 trigger cells (green line), calorimeter (red line) (a); number of calorimeter crystals triggered N_{tr} in an event for $E_\gamma = 50$ MeV (b)

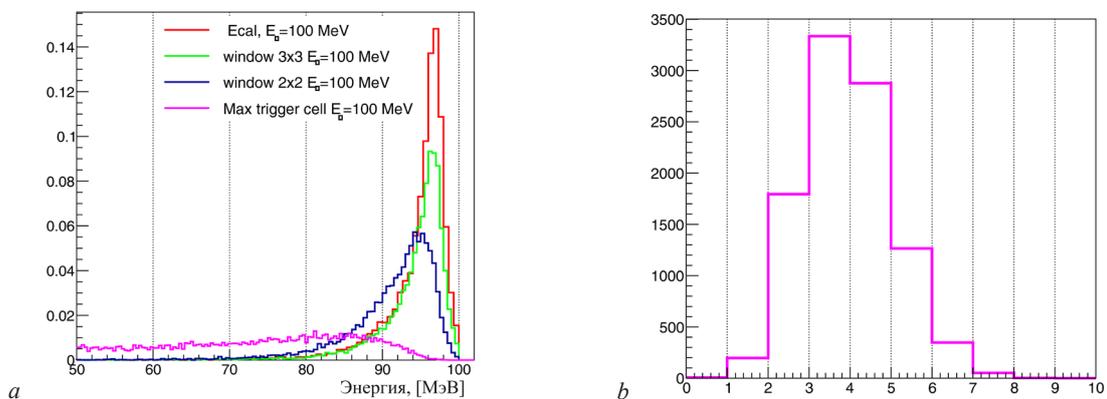


Рис. 6. Спектр энерговыведения в кластерах разных размеров для фотонов с энергией 100 МэВ: триггерная ячейка (фиолетовая линия), кластер из 2×2 триггерных ячеек (синяя линия), кластер из 3×3 триггерных ячеек (зеленая линия), калориметр (красная линия) (a); число сработавших кристаллов N_{cr} калориметра в событие для $E_\gamma = 100$ МэВ (b)

Fig. 6. The spectra of the deposited energy in clusters of different sizes for photons with the energy of 100 MeV: trigger cell (purple line), cluster of 2×2 trigger cells (blue line), cluster of 3×3 trigger cells (green line), calorimeter (red line) (a); number of calorimeter crystals triggered N_{tr} in an event for $E_\gamma = 100$ MeV (b)

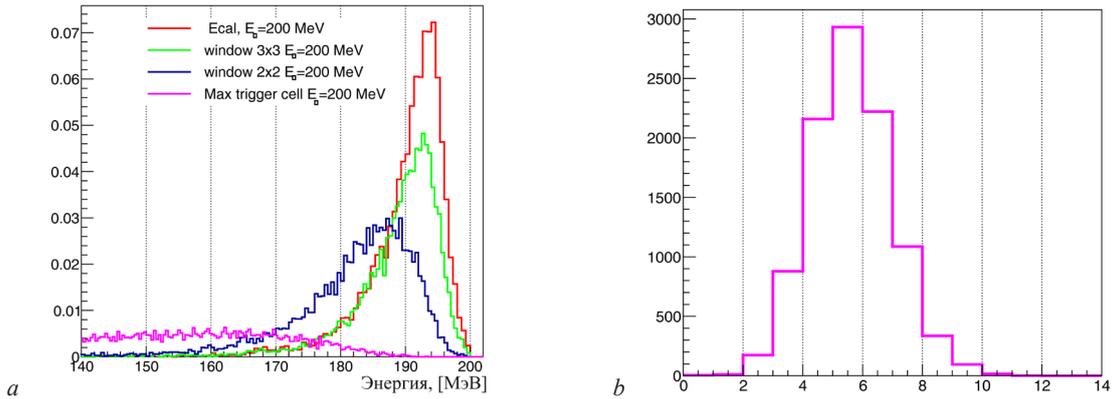


Рис. 7. Спектр энерговыведения в кластерах разных размеров для фотонов с энергией 200 МэВ: триггерная ячейка (фиолетовая линия), кластер из 2×2 триггерных ячеек (синяя линия), кластер из 3×3 триггерных ячеек (зеленая линия), калориметр (красная линия) (a); число сработавших кристаллов N_{tr} калориметра в событие для $E_\gamma = 200$ МэВ (b)

Fig. 7. The spectra of the deposited energy in clusters of different sizes for photons with the energy of 200 MeV: trigger cell (purple line), cluster of 2×2 trigger cells (blue line), cluster of 3×3 trigger cells (green line), calorimeter (red line) (a); number of calorimeter crystals triggered N_{tr} in an event for $E_\gamma = 200$ MeV (b)

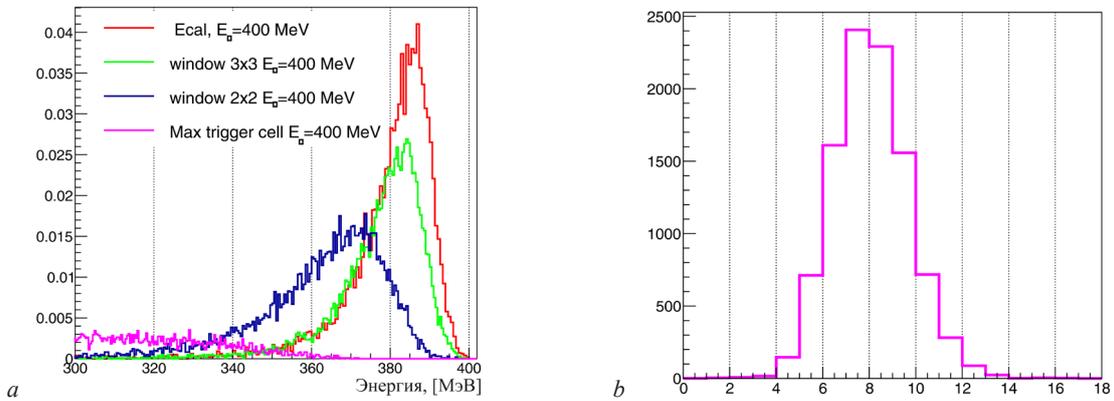


Рис. 8. Спектр энерговыведения в кластерах разных размеров для фотонов с энергией 400 МэВ: триггерная ячейка (фиолетовая линия), кластер из 2×2 триггерных ячеек (синяя линия), кластер из 3×3 триггерных ячеек (зеленая линия), калориметр (красная линия) (a); число сработавших кристаллов калориметра в событие для $E_\gamma = 400$ МэВ (b)

Fig. 8. The spectra of the deposited energy in clusters of different sizes for photons with the energy of 400 MeV: trigger cell (purple line), cluster of 2×2 trigger cells (blue line), cluster of 3×3 trigger cells (green line), calorimeter (red line) (a); number of calorimeter crystals triggered in an event for $E_\gamma = 400$ MeV (b)

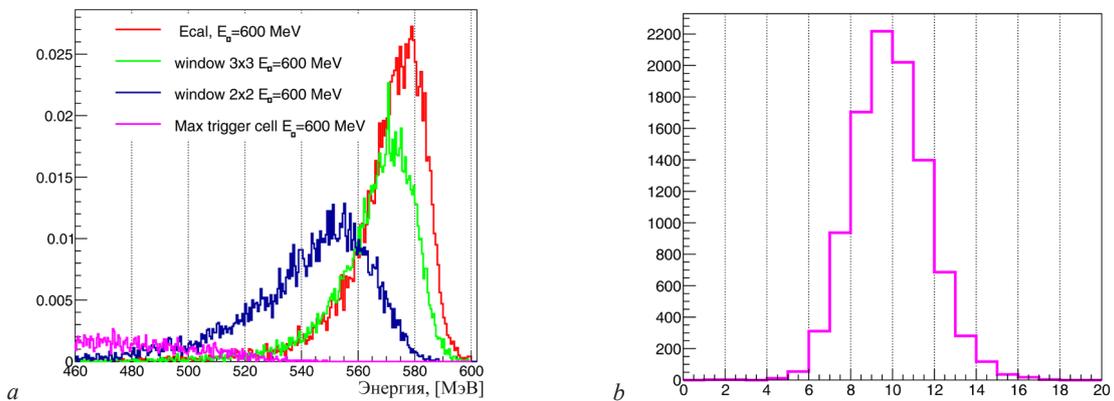


Рис. 9. Спектр энерговыведения в кластерах разных размеров для фотонов с энергией 600 МэВ: триггерная ячейка (фиолетовая линия), кластер из 2×2 триггерных ячеек (синяя линия), кластер из 3×3 триггерных ячеек (зеленая линия), калориметр (красная линия) (a); число сработавших кристаллов калориметра в событие для $E_\gamma = 600$ МэВ (b)

Fig. 9. The spectra of the deposited energy in clusters of different sizes for photons with the energy of 600 MeV: trigger cell (purple line), cluster of 2×2 trigger cells (blue line), cluster of 3×3 trigger cells (green line), calorimeter (red line) (a); number of calorimeter crystals triggered in an event for $E_\gamma = 600$ MeV (b)

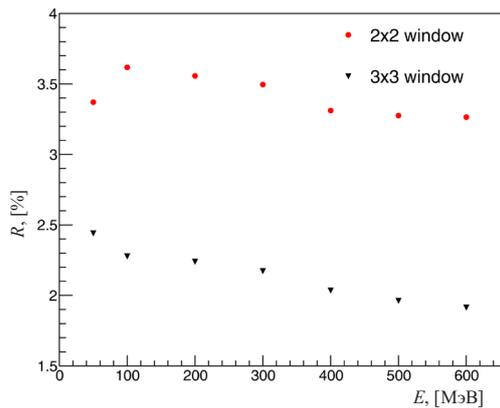


Рис. 10. Зависимость энергетического разрешения двух типов кластеров от энергии

Fig. 10. Energy dependence of energy resolution for the both types of clusters

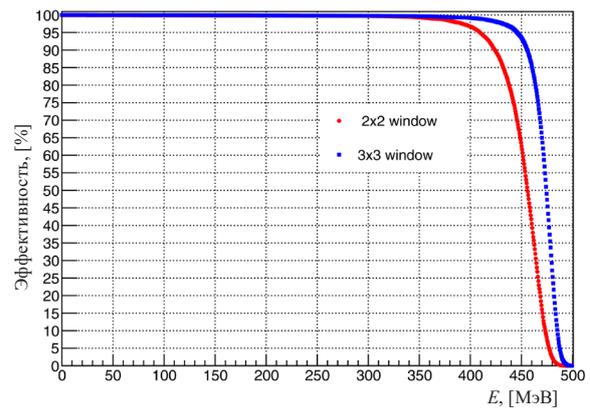


Рис. 11. Поведение эффективности запуска нейтрального триггера в зависимости от порога для первоначальной энергии фотона, равной 500 МэВ

Fig. 11. The behavior of the trigger efficiency as a function of the threshold for the initial photon energy of 500 MeV

Для предотвращения искажений аппроксимация производилась единым образом в широкой области для каждого размера кластера. В результате аппроксимации определяется среднее значение энергосодержания E_{mean} и величина среднеквадратичного отклонения σ , которые используются для расчета энергетического разрешения кластера по формуле

$$R = \frac{\sigma}{E_{\text{mean}}} 100 \% . \quad (3)$$

На рис. 10 показана динамика изменения энергетического разрешения двух типов кластеров (3×3 и 2×2) в зависимости от энергии.

Также проводилось моделирование эффективности запуска в зависимости от порога, налагаемого на восстановленную энергию для каждого размера кластера. Эффективность триггера определялась как доля сигнальных событий с энергией, выше выбранного порога срабатывания. На рис. 11 приведена эффективность запуска триггерной системы от величины порога для первоначальной энергии фотона, равной 500 МэВ. Из рисунка следует, что 95 % эффективности нейтрального триггера соответствует порогу 410 МэВ для кластера из 2×2 триггерных ячеек и 445 МэВ – из 3×3 триггерных ячеек. С уменьшением первоначальной энергии фотона разница между порогами, обеспечивающими 95 % эффективности запуска нейтрального триггера обоих кластеров, очевидно, будет уменьшаться.

Если требовать эффективность запуска нейтрального триггера на уровне 99 % для типичных в эксперименте КМД-3 энергий фотонов $\sim 50\text{--}200$ МэВ, попадающих в калориметры, то величина порога для обоих размеров кластера будет близкой, что подтверждают данные таблицы.

Величина порога, обеспечивающая 99 % эффективности запуска нейтрального триггера на основе кластеров разного размера

Energy threshold corresponds to 99 % efficiency of neutral trigger for clusters of different sizes

Энергия (МэВ)	Порог (МэВ), эффективность 99 %	
	Кластер 2×2	Кластер 3×3
30	8	8
40	18	19
50	28	30
60	35	38
80	49	53
100	64	70
150	97	111
200	131	150

Окончание таблицы

Энергия (МэВ)	Порог (МэВ), эффективность 99 %	
	Кластер 2 × 2	Кластер 3 × 3
300	203	238
400	279	322
500	362	406
600	444	491

Для изучения нейтральных событий цикл оцифровки будет запускаться только нейтральным триггером, поэтому он должен обладать высоким пространственным (координатным) разрешением. Рассмотрим случай, когда в полезном событии в калориметр попало N фотонов. Приведем для таких случаев оценку вероятности того, что нейтральный триггер правильно определяет количество гамма-квантов. Разбиение калориметрической системы на триггерные ячейки организовано таким образом, что их угловой размер практически одинаковый $\sim a = 0,0022$ ср. Тогда вероятность корректно определить количество фотонов с окном из 2×2 триггерных ячеек при N попавших в весь детектор фотонах может быть записана как

$$P_{2 \times 2}(N) = \Pi_1^N (1 - 4a(N - 1)), \tag{4}$$

в случае окна из 3×3 триггерных ячеек как

$$P_{3 \times 3}(N) = \Pi_1^N (1 - 9a(N - 1)). \tag{5}$$

Оценка вероятности корректно подсчитать количество гамма-квантов, попавших в калориметр, в зависимости от размера кластера приведена на рис. 12.

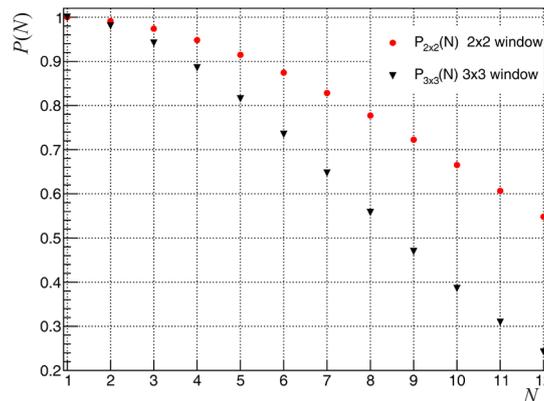


Рис. 12. Вероятность правильно определить количество попавших в калориметр фотонов

Fig. 12. Probability of correct determining the number of entering the calorimeter photons

Как видно из рис. 12, уже при $N = 5$ фотонов, попавших в калориметр, разница в вероятности для двух размеров кластеров составляет 10 % (кластер из 2×2 триггерных ячеек – 91 %, кластер из 3×3 триггерных ячеек – 81 %).

Заключение. В работе предлагается использовать алгоритм кластеризации на основе перекрывающихся «окон» суммирования триггерных ячеек для организации нейтрального триггера детектора КМД-3. Проведено детальное моделирование методом Монте-Карло двух алгоритмов выбора кластера. Исходя из его результатов наиболее оптимальным выбором является кластер из 2×2 триггерных ячеек, поскольку он обеспечивает требуемое энергетическое разрешение калориметра в режиме реального времени, высокую эффективность запуска и имеет лучшее координатное разрешение.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-42-10025, <https://rscf.ru/project/23-42-10025/>) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф23РНФ-118).

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-42-10025, <https://rscf.ru/project/23-42-10025/>) and the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. Ф23РНФ-118).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Khazin, B. Physics and Detectors for VEPP-2000 / B. Khazin // Nucl. Phys. B. – Proc. Supplements. – 2008. – Vol. 181–182. – P. 376–380. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.068>
2. Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.20 ppm / D. P. Aguillard [et al.]; Muon $g - 2$ Collaboration // Phys. Rev. Lett. – 2023. – Vol. 131, № 16. – Art. ID 161802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.161802>
3. Measurement of the Pion Form Factor with CMD-3 Detector and Its Implication to the Hadronic Contribution to Muon ($g - 2$) / F. V. Ignatov [et al.]; CMD-3 Collaboration // Phys. Rev. Lett. – 2024. – Vol. 132, № 23. – Art. ID 231903. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.132.231903>
4. The level-1 trigger system for the electromagnetic calorimeter of the COMET experiment / L. B. Epshteyn [et al.] // J. Instrum. – 2017. – Vol. 12. – Art. ID C01064.
5. Система предварительного отбора событий электромагнитного калориметра эксперимента COMET / Д. В. Шёлковый [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2019. – Т. 55, № 1. – С. 97–109. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-1-97-109>

References

1. Khazin B. Physics and Detectors for VEPP-2000. *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 2008, vol. 181–182, pp. 376–380. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.068>
2. Aguillard D. P., Albahri T., Allspach D., Anisenkov A., Badgley K., Baeßler S., Bailey I. [et al.] (Muon $g - 2$ Collaboration). Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.20 ppm. *Physical Review Letters*, 2023, vol. 131, no. 16, art. ID 161802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.161802>
3. Ignatov F. V., Akhmetshin R. R., Amirkhanov A. N., Anisenkov A. V., Aulchenko V. M., Bashtovoy N. S., Berkaev D. E. [et al.] (CMD-3 Collaboration). Measurement of the Pion Form Factor with CMD-3 Detector and Its Implication to the Hadronic Contribution to Muon ($g - 2$). *Physical Review Letters*, 2024, vol. 132, no. 23, art. ID 231903. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.132.231903>
4. Epshteyn L. B., Akhmetshin R. R., Grigoriev D. N., Kazanin V. F., Melnik A. S., Shoukavy Dz. V., Yudin Yu. V. The level-1 trigger system for the electromagnetic calorimeter of the COMET experiment. *Journal of Instrumentation*, 2017, vol. 12, art. ID C01064. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/c01064>
5. Shoukavy Dz. V., Grigoriev D. N., Epshteyn L. B., Yudin Yu. V. Electromagnetic calorimeter of the trigger system for the COMET experiment. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 97–109 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-1-97-109>

Информация об авторах

Шёлковый Дмитрий Викторович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shoukavy@ifanbel.bas-net.by

Гаркуша Сергей Николаевич – научный сотрудник, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: harkusha@dragon.bas-net.by

Горковенко Антон Олегович – инженер-исследователь, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Российская Федерация); ассистент, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: A.O.Gorkovenko@inp.nsk.su

Григорьев Дмитрий Николаевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (11, пр. Академика Лаврентьева, Новосибирск, 630090, Российская Федерация); доцент, Новосибирский государственный технический университет (20, пр. К. Маркса, 630073, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: d.n.grigoriev@inp.nsk.su

Information about the authors

Dzmitry V. Shoukavy – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shoukavy@ifanbel.bas-net.by

Siarhei N. Harkusha – Researcher, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: harkusha@dragon.bas-net.by

Anton O. Gorkovenko – Research Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademik Lavrent'ev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Assistant, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: A.O.Gorkovenko@inp.nsk.su

Dmitry N. Grigoriev – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (11, Akademik Lavrent'ev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: d.n.grigoriev@inp.nsk.su