

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 539.12

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-4-470-478>

Поступила в редакцию 09.11.2021

Received 09.11.2021

Д. В. Шёлковский¹, Д. Н. Григорьев^{2,3,4}, Д. С. Василевская¹¹Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия⁴Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия**МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ СОБЫТИЙ С НАЛОЖЕНИЕМ СИГНАЛОВ**

Аннотация. Предложен метод для устранения фона от наложения сигналов от разных, почти одновременно происходящих событий в калориметре для эксперимента COMET. Основная идея состоит в использовании распределения по параметру хи-квадрат, полученному при аппроксимации зарегистрированного сигнала средней формой сигналов. Разработанный метод применен к реконструкции событий с наложением сигналов от электрона и радиационного захвата нейтронов ядром ^{175}Lu ; и в случае наложения сигналов от двух электронов, родившихся в результате распада мюонов в связанном состоянии с ядром алюминия с импульсами, вызывающим «ложный» сигнал $\mu - e$ конверсии. Метод показал хорошую способность к разделению событий с наложением сигналов, время разделения значительно меньше ширины на уровне половинной амплитуды средней формы сигнала.

Ключевые слова: реконструкция событий, наложение сигналов, калориметр, эксперимент COMET

Для цитирования. Шёлковский, Д. В. Метод разделения событий с наложением сигналов / Д. В. Шёлковский, Д. Н. Григорьев, Д. С. Василевская // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 470–478. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-4-470-478>

Dzmitry V. Shoukavy¹, Dmitry N. Grigoriev^{2,3,4}, Darya S. Vasileuskaya¹¹B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus²Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia⁴Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia**THE METHOD OF EVENTS SEPARATION WITH OVERLAPPING SIGNALS**

Abstract. In this paper, we propose a method for the rejection of the background from the superposition of signals from different, almost simultaneously occurring events in the calorimeter for the COMET experiment. The basic idea is to use the chi-squared distribution obtained from fitting the recorded shape of the signal with an average waveform. The elaborated method is applied for the reconstruction of events with overlapping signals from the electron and radiative capture of neutrons by the ^{175}Lu nucleus, as well as overlapping signals from two electrons born as a result of the decay of muons in the bound state with an aluminum nucleus with impulses causing a “false” signal of the $\mu - e$ conversion. The method showed a good ability to separate events, meanwhile, the separation time is significantly less than the FWHM of the pulse shape.

Keywords: event reconstruction, pile-up, calorimeter, COMET experiment

For citation. Shoukavy Dz. V., Grigoriev D. N., Vasileuskaya D. S. The method of events separation with overlapping signals. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 470–478 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-4-470-478>

Введение. На сегодняшний день совокупность существующих экспериментальных данных, полученных в ускорительных экспериментах, успешно описывается Стандартной моделью (СМ), которая включает в себя теорию электрослабых взаимодействий и квантовую хромодинамику. Вместе с тем не вызывает сомнений тот факт, что СМ не является окончательной теорией, а служит низкоэнергетическим пределом некоторой общей теории, учитывающей гравитационное взаимодействие и включающей дополнительные механизмы нарушения симметрий, новые частицы. Это связано с тем, что Стандартная модель не способна описать некоторые явления, наблюдаемые в природе: происхождение темной материи и темной энергии, величину асимметрии вещества и антивещества и другие проблемы. Теории, выходящие за рамки СМ, которые

необходимы для объяснения ее недостатков – называют физикой за пределами Стандартной модели, или Новой физикой.

По соглашению лептонам присваивается лептонное квантовое число $L = +1$, для антилептонов $L = -1$. Частицы, не являющиеся лептонами, обладают нулевыми лептонными числами. Лептонам трех разных поколений сопоставляются лептонные квантовые числа (лептонные ароматы) L_e, L_μ, L_τ – электронный, мюонный и таонный ароматы соответственно. Общее лептонное число L равно сумме ароматных лептонных чисел. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что во всех процессах, происходящих в замкнутой системе в результате сильных электромагнитных и слабых взаимодействий, каждое лептонное число L_e, L_μ и L_τ сохраняется независимо. Эффект нейтринного смешивания [1], связанный с наличием у нейтрино ненулевой массы и проявляющийся в осцилляциях нейтрино различных типов, приводит к нарушению закона сохранения лептонного числа в заряженном секторе. Однако в рамках Стандартной модели он бесконечно мал, и вероятность таких процессов меньше 10^{-55} . В то же время практически во всех теориях за рамками СМ вероятность указанных процессов на десятки порядков больше, поэтому обнаружение нарушения лептонного числа в заряженном секторе является четким доказательством Новой физики.

В настоящее время разработаны методы (например, метод на основе открытой магнитной ловушки), позволяющие на 3–4 порядка увеличить интенсивность мюонного пучка по сравнению с предыдущими [2] и тем самым повысить чувствительность эксперимента по проверке СМ на несколько порядков в редких распадах мюонов.

Эксперимент СОМЕТ. Проект СОМЕТ (от англ. COherent Muon to Electron Transition) [3] является одним из прецизионных экспериментов, исследующих возможную расширенную теорию физики элементарных частиц. Главная задача проекта – поиск когерентной конверсии мюона в электрон в области ядра без излучения нейтрино: $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$ ($\mu - e$ конверсия), с чувствительностью одного события $\sim 3 \cdot 10^{-17}$, которая превосходит результаты лучшего предыдущего эксперимента SINDRUM-2 [4] на 4 порядка. Этот процесс нарушает закон сохранения числа лептонных ароматов на одну единицу, следовательно, имеет бесконечно малую вероятность в Стандартной модели физики элементарных частиц и его экспериментальное обнаружение станет безусловным свидетельством физики за рамками СМ. Эксперимент СОМЕТ проводится на ускорительном комплексе J-PARC (Япония), производящим импульсный пучок мюонов с рекордной интенсивностью.

Основная идея эксперимента заключается в использовании импульсного пучка протонов, в котором их утечка между импульсами максимально подавлена и измерения $\mu - e$ конверсии проводится с задержкой по времени. В эксперименте СОМЕТ мюонный пучок будет получен в результате распада пионов, рождаемых в столкновениях протонов с графитовой мишенью. Первичные протоны формируются в сгустки и выпускаются на мишень с периодом 1,17 мкс с длительностью сгустка 100 нс. Поскольку время жизни мюона в алюминии составляет 864 нс, то измерение $\mu - e$ конверсии во временном окне от 800 до 1200 нс после выпуска сгустка позволит устранить пучковый фон. Для достижения проектной чувствительности эксперимента СОМЕТ требуется 10^{11} остановившихся мюонов в мишени алюминия в секунду. После остановки мюона возможны процессы: распад на $1s$ -орбитали, захват мюона ядром с образованием нового ядра или $\mu - e$ конверсия. Основным преимуществом при проведении когерентной $\mu - e$ конверсии в поле ядра выступает то обстоятельство, что на выходе этой реакции возникает всего лишь одна частица, которую необходимо детектировать – электрон с энергией $E = m_\mu - B_\mu - E_{\text{rec}}$, где m_μ – масса мюона, а B_μ и E_{rec} – энергия связи мюона в ядре и энергия отдачи ядра соответственно. Обе эти величины малы по сравнению с массой мюона, поэтому можно считать, что $E \approx m_\mu \sim 105$ МэВ.

В связи со сложностью эксперимента было принято решение разделить его на несколько этапов – так называемых Фаза-а, Фаза-I, Фаза-II. Предварительный этап – Фаза-а – проводится с целью проверки работоспособности подсистем и диагностики протонного пучка, в частности, определение коэффициента «нежелательной» утечки протонов между сгустками, изучение выхода пионов / мюонов на первичный протон и измерение кинематических параметров (время, энергия) вторичных частиц на выходе из транспортного соленоида. Таким образом, Фаза-а пре-

доставит конкретную информацию, на которой будут основываться измерения на следующей стадии эксперимента СОМЕТ – Фазе-І. На этом этапе физическая задача состоит в осуществлении поиска $\mu - e$ конверсии с промежуточной чувствительностью $3 \cdot 10^{-15}$ с детектором на основе цилиндрической дрейфовой камеры, что в 100 раз превосходит предыдущее экспериментальное ограничение [4]. Также в рамках Фазы-І будет проведено изучение состава мюонного пучка и измерение фонов, что требуется для разработки второго этапа, так как указанные данные отсутствуют. Соответствующие измерения будут проведены с помощью детекторной секции, состоящей из пяти станций координатного детектора на основе дрейфовых трубок и электромагнитного калориметра на базе сцинтилляционных кристаллов – эта секция является прототипом для последнего этапа эксперимента (Фаза-ІІ). Для достижения заявленной чувствительности будет использоваться полномасштабная транспортная линия соленоидов с поворотом на 360° , в результате чего улучшится точность отбора частиц по электрическому заряду и импульсу.

Метод идентификации событий с наложением. Задача алгоритма реконструкции состоит в определении величины энерговыделения электрона в калориметре с использованием зарегистрированной формы сигнала. Один из основных эффектов, который приводит к появлению зависимости результатов реконструкции от загрузки, связан с наложением сигналов от разных, почти одновременно происходящих событий. То есть если два или более электронов от фоновых процессов попадают в калориметр достаточно близко по времени друг к другу, то их сигналы перекрываются и могут дать «ложный» сигнал $\mu - e$ конверсии.

Для офлайн анализа предлагается метод реконструкции событий с наложением сигналов, основанный на аппроксимации измеренной формы сигнала стандартной формой. Для того чтобы определить параметры сигнала, нужно знать его форму для каждого канала электроники. В качестве стандартной предлагается использовать среднюю форму сигнала, так как оцифровывающая электроника калориметра имеет частоту дискретизации 1 ГГц, что позволяет очень точно установить его параметры. Стандартная форма сигнала определялась из экспериментальных данных по тестированию прототипа калориметра на выведенном пучке электронов (КЕК, Япония) с энергией от 65 до 185 МэВ с шагом 20 МэВ. Прототип калориметра представлял собой сборку из 64 сцинтилляционных кристаллов LYSO ($\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$) сечением $2 \times 2 \text{ см}^2$ и длиной 12 см. Для построения стандартной формы отбирались «чистые» (без наложения) сигналы электронов с амплитудой более 40 мВ, что соответствует энерговыделению в кристалле более 8 МэВ на статистике 100 тыс. событий. Это связано с тем обстоятельством, что форма сигнала при маленьких амплитудах не сохраняется (рис. 1), т. е. величина площади под кривой сигнала при значениях амплитуды менее 40 мВ сильно «плавает», поэтому такие события для построения средней формы сигнала отбрасываются.

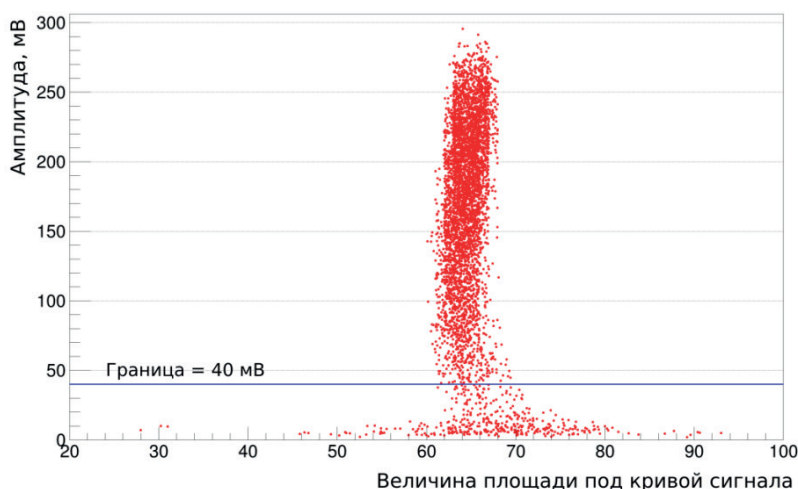


Рис. 1. Зависимость формы сигнала от амплитуды

Fig. 1. The dependence of the waveform shape on the amplitude

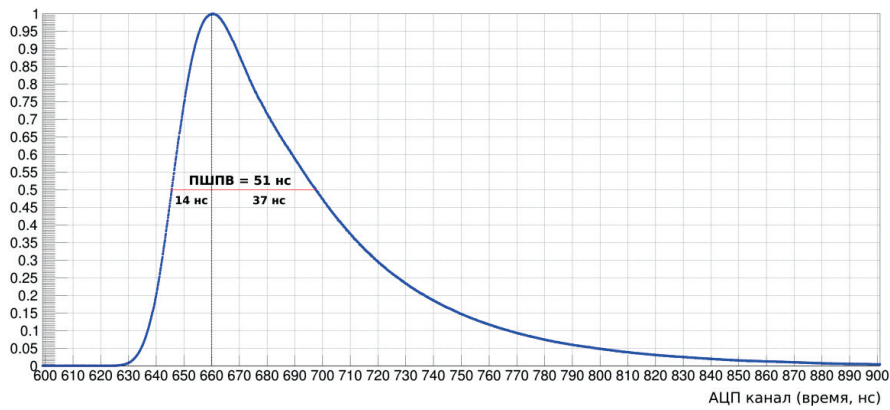


Рис. 2. Средняя форма сигнала, отнормированная на амплитуду

Fig. 2. The average waveform normalized on the amplitude

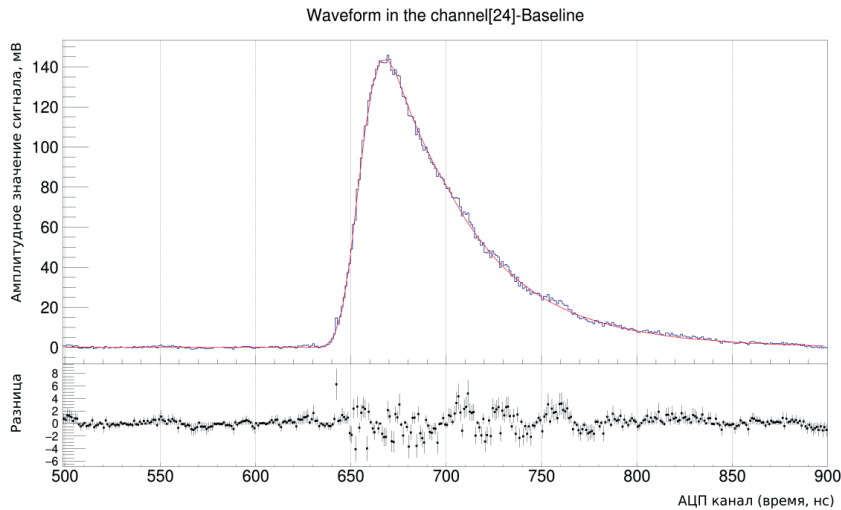


Рис. 3. Пример аппроксимации «чистого» сигнала, предложенной средней формой сигнала. Сигнал (синяя линия) соответствует энерговыделению в кристалле 33,2 МэВ. Внизу приведена разница между значениями сигнала и аппроксимирующей функцией

Fig. 3. An example of the approximation of the “pure” signal by the proposed average waveform. For the signal (blue line) we have the 33.2 MeV energy deposition in crystal. The difference between the signal values and the fitting function is given below

Методика получения стандартной формы заключалась в том, чтобы для каждого отобранного «чистого» сигнала определить его параметры: амплитуду – A , время – T и пьедестал – P , отнормировать: $[t_i, a_i] \rightarrow [t_i - T, (a_i - P)/A]$ и затем усреднить по событиям. Полученная таким способом стандартная форма сигнала показана на рис. 2.

На рис. 3 представлен пример аппроксимации средней формой «чистого» сигнала, соответствующего энерговыделению в кристалле 33,2 МэВ.

Для идентификации сигналов с наложением предлагается использовать распределение по параметру хи-квадрат, полученное при аппроксимации сигналов стандартной формой.

Апробация метода. Мюоны, захваченные атомами алюминия, имеют вероятность 39,1 % распасться по каналу $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$. Большинство таких распадов дают высокоэнергетические электроны. Поскольку эти электроны происходят от остановок мюонов в мишени, их распределение по времени совпадает с распределением по времени потенциальных конверсионных электронов. Более того, логарифмический хвост их энергетического распределения тянется в сигнальную область. В результате доступно очень узкое окно по импульсу, где сигнал от $\mu - e$ конверсии превышает фон от распада мюонов в связанном состоянии с ядром.

Наложение двух электронов. В рамках эксперимента СОМЕТ вполне реализуема ситуация, когда два электрона от фоновых процессов (наиболее вероятно от распада мюона в связанном состоянии с ядром алюминия ввиду интенсивных остановок мюонов в алюминиевой мишени) попадут в один и тот же кристалл калориметра близко по времени друг к другу. В результате их сигналы наложатся друг на друга и при определенных условиях могут дать «ложный» сигнал $\mu - e$ конверсии.

Рассмотрим эту ситуацию более детально, промоделировав наложение двух электронов с близкими импульсами друг к другу, дающими «ложный» сигнал $\mu - e$ конверсии, и оценим эффективность предложенного метода для идентификации таких наложенных событий. С этой целью изначально формировалась база данных, соответствующая сигналу $\mu - e$ конверсии, путем отбора из экспериментальных данных по тестированию прототипа калориметра на выведенном пучке электронов, «чистых» событий с энерговыделением в кристалле от 100 до 105 МэВ. Затем аналогичным образом формировалась база данных для фоновых электронов путем отбора «чистых» сигналов с энерговыделением в кристалле от 50 до 55 МэВ.

Далее моделировалась ситуация наложения сигналов от двух фоновых электронов в калориметре. Для удобства полагается, что в момент времени $t = 0$ нс в калориметр попал «первый» электрон, импульс от «второго» электрона добавляется к первому сигналу со сдвигом по времени $\Delta t = t_2 - t_1$, где t_1 – время попадания в кристалл «первого» электрона, t_2 – «второго электрона», от -24 нс до 24 нс с шагом 2 нс. Знак минус указывает на то, что первым пришел сигнал от «второго» электрона. Очевидно, что если эти электроны попали в кристалл в одно и то же время $t = 0$ нс, то эта ситуация неотличима от сигнала $\mu - e$ конверсии, однако с появлением разницы во времени прихода фоновых сигналов возникает возможность идентифицировать это событие как событие с наложением, используя распределение по параметру хи-квадрат (рис. 4). Как показано на рис. 5, метод позволяет со 100%-ной эффективностью идентифицировать наложенное событие при разнице как минимум в 10 нс между приходом двух фоновых электронов, оставляющих в кристалле энерговыделение ~ 50 МэВ. В то же время с уменьшением разницы во времени между сигналами эффективность резко падает, а именно: при разнице 7 нс она составляет 50% , а при 5 нс – менее 10% (см. рис. 5).

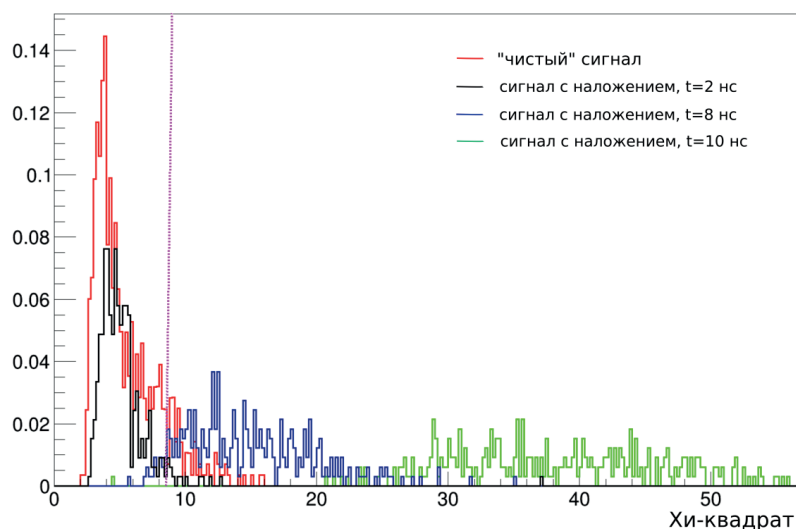


Рис. 4. Распределение хи-квадрат в случае «чистого» сигнала электрона с энергией 100 МэВ (красный цвет); для наложенного события: 50 МэВ (электрон) + 50 МэВ (электрон) для времени между сигналами $\Delta t = 2$ нс (черный), $\Delta t = 8$ нс (синий), $\Delta t = 10$ нс (зеленый). Вертикальная линия соответствует критерию «ложной» идентификации (mis-ID) для 5% событий

Fig. 4. The chi-square distribution for the cases: electron signal of 100 MeV energy (red color), pile-up pulse by overlapping of the two 50 MeV electron signals in the case when the time between pulses $\Delta t = 2$ ns (black), $\Delta t = 8$ ns (blue), $\Delta t = 10$ ns (green). The vertical line corresponds to 5% mis-identification

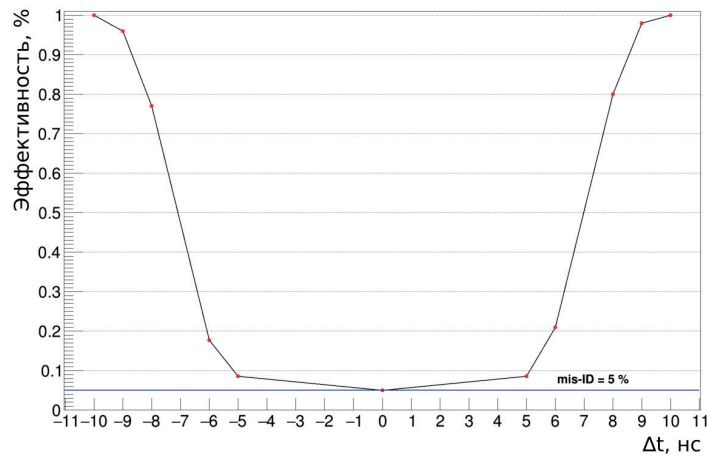


Рис. 5. Зависимость эффективности разделения событий от разницы во времени между сигналами, соответствующими энерговыделению в кристалле ~50 МэВ каждый при разрешенной «ложной» идентификации (mis-ID) для 5 % событий

Fig. 5. The dependence of the separation efficiency on the time difference between pulses at mis-identification of 5 %. Each of them corresponds to the 50 MeV energy deposition in the crystal

Наложение сигналов от фонового электрона и радиационного захвата нейтронов ядром ^{175}Lu . В рамках эксперимента COMET ожидается, что за счет реакции радиационного захвата (n, γ) спектр фоновых электронов будет сдвинут в сигнальную область. Дело в том, что большое количество нейтронов, которые возникают в основном в результате взаимодействия протонов с мишенью и сброса пучка, могут создавать в калориметре непрерывный фоновый сигнал. Монте-Карло моделирование показало, в условиях первой стадии эксперимента для калориметра за 100 дней ожидается поток нейтронов 10^{12} на квадратный сантиметр и в энергетическом спектре преобладают медленные нейтроны, которые можно считать равномерно распределенными во времени. Калориметр эксперимента COMET основан на сцинтилляционных кристаллах LYSO ($\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5:\text{Ce}$) с сечением $2 \times 2 \text{ см}^2$ и длиной 12 см. Процентное содержание лутеция в кристалле LYSO составляет ~71 %. Стоит отметить, что природный лутеций состоит из стабильного изотопа ^{175}Lu (97,41 %) и долгоживущего бета-радиоактивного ^{176}Lu (2,59 %). На рис. 6 приведены зависимости сечения радиационного захвата нейтрона ядрами ^{175}Lu и ^{176}Lu от энергии нейтронов, построенные на основе данных библиотеки ядерных данных JEFF-3.1 (Joint Evaluated Fission and Fusion File).

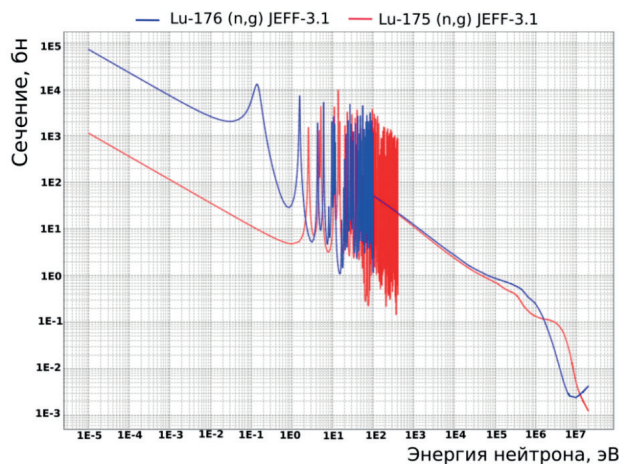


Рис. 6. Сечение радиационного захвата нейтрона ядрами ^{175}Lu и ^{176}Lu

Fig. 6. The cross-section of the radiative capture of the neutron by the ^{175}Lu and ^{176}Lu nucleus

Длина свободного пробега нейтрона в веществе L определяется как

$$L = 1/\Sigma. \quad (1)$$

Величина Σ имеет размерность обратной длины (см^{-1}), называется линейным коэффициентом ослабления потока нейтронов в веществе и рассчитывается как

$$\Sigma = N\sigma, \quad (2)$$

где N – число ядер в единице объема вещества, σ – полное сечение взаимодействия нейтронов с веществом. Число ядер в 1 см^3 находится по формуле

$$N = mN_A/\mu, \quad (3)$$

где m – масса, N_A – число Авогадро, μ – молярная масса.

Подставляя формулы (3), (2) в (1) и для простоты полагая $\sigma = 100$ бн, что соответствует сечению радиационного захвата нейтрона ядром ^{175}Lu для энергии нейтрона 10^{-3} эВ (см. рис. 3), получим длину свободного пробега в кристалле LYSO ~ 1 см. Соответственно можно ожидать, что большинство медленных нейтронов захватятся лютецием, при этом энергия возбуждения образующегося составного ядра излучается в виде γ -квантов, которые поглотятся в кристалле, давая дополнительное энерговыделение ~ 7 МэВ. Когда такие малые по амплитуде сигналы от (n, γ) накладываются на сигнал с большим энерговыделением от электрона, то они искажают его реконструированные параметры и приводят к тому, что спектр фоновых событий сдвигается в сигнальную область. Разница с обычным наложением сигналов состоит в том, что сигналы с малой амплитудой не регистрируются, их амплитудное и временное распределения неизвестны. Поэтому важно, чтобы сигналы с маленькой амплитудой не приводили к систематическому изменению реконструированных параметров сигналов.

Для моделирования данной ситуации использовалась следующая схема. На начальном этапе формировались сигналы, соответствующие радиационному захвату нейтрона в кристалле LYSO. Для этого создавалась база данных значений шума электроники путем вырезания области в амплитудном спектре с 50-го по 550-й канал, в которой заведомо нет сигнала. Далее стандартную форму сигнала масштабировали таким образом, чтобы амплитуда сигнала соответствовала энергии 7 МэВ, и складывали с шумом случайным образом, взятым из базы данных. Визуально эта процедура моделирования сигнала от процесса (n, γ) изображена на рис. 7.

На втором этапе анализа из экспериментальных данных по тестированию прототипа калориметра на выведенном пучке электронов отбирались события, соответствующие энерговыделению в кристалле от 10 до 100 МэВ. Далее моделировалась ситуация наложения сигналов от электрона и (n, γ) в калориметре по аналогии с предыдущим случаем и исследовалась эффективность разделения «чистых» событий от событий с наложением в зависимости от времени между наложенными сигналами и энергией электрона (рис. 8).

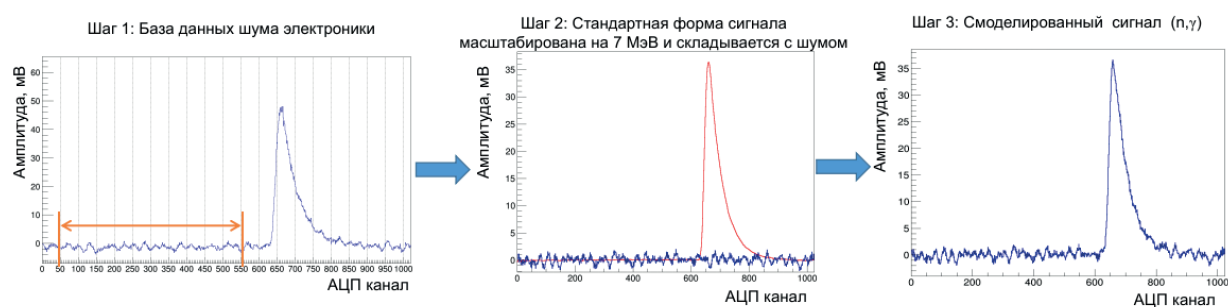


Рис. 7. Процедура формирования сигнала (n, γ)

Fig. 7. The (n, γ) signal construction procedure

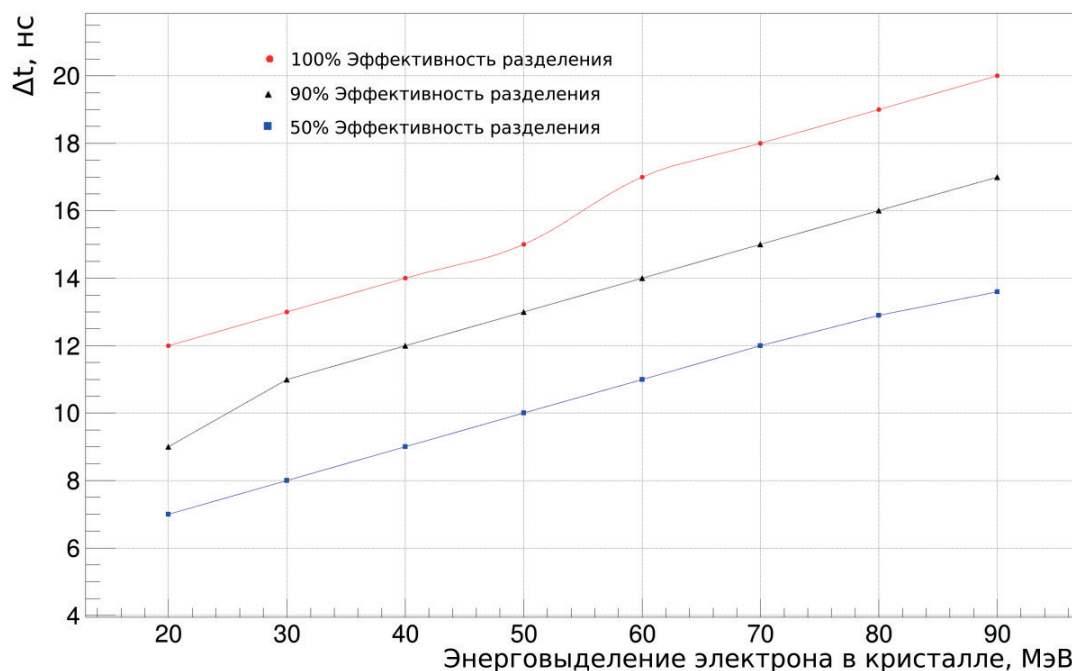


Рис. 8. Зависимость времени между наложенными сигналами от энергии электрона для различных эффективностей: ● – эффективность разделения 100 %, ▲ – эффективность разделения 90 %, ■ – эффективность разделения 50 %

Fig. 8. The dependence of time between pulses on an electron energy for different values of efficiency: ● – 100% separation efficiency, ▲ – 90% separation efficiency, ■ – 50% separation efficiency

Как следует из рис. 8, метод позволяет со 100%-ной эффективностью идентифицировать наложенный сигнал от электрона с энерговыведением в кристалле 90 МэВ и радиационного захвата нейтрона в том же кристалле при их временной разнице 20 нс, что в 2,5 раза меньше, чем полуширина на полувысоте стандартной формы сигнала 51 нс. Также время разделения сигналов от электрона и (n, γ) линейно уменьшается при уменьшении величины энерговыведения электрона в кристалле.

Заключение. Для эксперимента COMET разработан метод реконструкции событий на основе аппроксимации зарегистрированных сигналов стандартной формой сигнала. Идея получения стандартной формы состоит в том, чтобы для каждого сигнала из большого множества зарегистрированных «чистых» сигналов определить его параметры: амплитуду, время, пьедестал, с последующим нормированием и усреднением. Для разделения сигналов предлагается использовать распределение по параметру хи-квадрат, полученное при аппроксимации стандартной формой. Для апробации метода были смоделированы возможные ситуации наложения сигналов в калориметре, а именно: наложение двух фоновых электронов от распада мюона в связанном состоянии с ядром алюминия и наложением сигналов от электрона и радиационного захвата нейтронов ядром ^{175}Lu в кристалле LYSO. Рассматриваемый в статье подход оказался эффективным для разделения событий с наложением сигналов и время разделения стало значительно меньше ширины на уровне половинной амплитуды сигнала. Предложенный метод разделения близких по времени сигналов планируется использовать в эксперименте COMET.

Благодарности. Д. С. Василевская выражает благодарность Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку в рамках гранта № Ф21М-016.

Acknowledgement. D. S. Vasileuskaya acknowledge financial support provided by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research, Grant no. Ф21М-016.

Список использованных источников

1. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos / Y. Fukuda [et al. Super-Kamiokande Collaboration] // Phys. Rev. Lett. – 1998. – Vol. 81, № 81. – P. 1562–1567. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1562>

2. Delivering the world's most intense muon beam / S. Cook [et al.] // *Phys. Rev. Accel. Beams*. – 2017. – Vol. 20, № 3. – P. 030101(10). <https://doi.org/10.1103/physrevaccelbeams.20.030101>
3. COMET Collaboration. COMET Phase-I Technical Design Report // *Prog. Theor. Exp. Phys.* – 2020. – Vol. 2020, № 3. – P. 033C01.
4. Test of lepton-flavour conservation in $\mu \rightarrow e$ conversion on titanium / C. Dohmen [et al. SINDRUM II Collaboration] // *Phys. Lett. B*. – 1993. – Vol. 317, № 4. – P. 631–636. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(93\)91383-x](https://doi.org/10.1016/0370-2693(93)91383-x)

References

1. Fukuda Y., Hayakawa T., Ichihara E., Inoue K., Ishihara K., Ishino H., Itow Y., Kajita T., Kameda J., Kasuga S. [et al. Super-Kamiokande Collaboration]. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Physical Review Letters*, 1998, vol. 81, no. 81, pp.1562–1567. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1562>
2. Cook S., D'Arcy R., Edmonds A., Fukuda M., Hatanaka K., Hino Y., Kuno Y., Lancaster M., Mori Y., Ogitsu T., Sakamoto H., Sato A., Tran N. H., Truong N. M., Wing M., Yamamoto A., Yoshida M. Delivering the world's most intense muon beam. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 030101(10). <https://doi.org/10.1103/physrevaccelbeams.20.030101>
3. COMET Collaboration. COMET Phase-I Technical Design Report. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2020, vol. 2020, no. 3, p. 033C01.

Информация об авторах

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

Григорьев Дмитрий Николаевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); заведующий лабораторией, Институт ядерной физики СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Российская Федерация); доцент, Новосибирский государственный технический университет (20, пр. К. Маркса, 630073, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: d.n.grigoriev@inp.nsk.su

Василевская Дарья Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: d.vasilevskaya@ifanbel.bas-net.by, <https://orcid.org/0000-0002-1193-5237>

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

Dmitry N. Grigoriev – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory, Novosibirsk State University (2, Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Head of the Laboratory, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (11, akademika Lavrentieva Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation); Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, (20, K. Marksa Ave., 630073, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: d.n.grigoriev@inp.nsk.su

Darya. S. Vasileuskaya – Junior 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: d.vasilevskaya@ifanbel.bas-net.by, <https://orcid.org/0000-0002-1193-5237>