

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.8

КОМПАКТНЫЙ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР
НЕЙТРОНОВ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ 1–200 МэВ

©2026 г. В. И. Юревич, Н. А. Лашманов*, В. Ю. Рогов, С. А. Седых,
С. В. Сергеев, М. Н. Капишин, С. М. Пиядин, С. Н. Базылев, И. В. Слепнев,
В. В. Тихомиров, А. В. Шутов, А. В. Щипунов, А. А. Тимошенко,
И. А. Филиппов, В. К. Величков

*Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6*

**e-mail: lashmanov@jinr.ru*

Поступила в редакцию 25.12.2025 г.

После доработки 15.01.2026 г.

Принята к публикации 05.02.2026 г.

Компактный времяпролетный спектрометр нейтронов разработан для изучения образования нейтронов в области больших углов в диапазоне энергий 1–200 МэВ. Он является частью установки VM@N на выведенном пучке тяжелых ионов ускорителя Нуклотрон в ОИЯИ. Для регистрации нейтронов используются детекторы на основе стиблена с кремниевыми фотоумножителями. Основными особенностями спектрометра являются высокое временное разрешение, малая пролетная база, полное подавление фона гамма-квантов методом дискриминации по форме импульса, возможность измерений в сильном магнитном поле и событийная запись оцифрованных данных. Характеристики спектрометра были изучены в эксперименте на пучке ядер ксенона с энергией 3.8 АГэВ.

1. ВВЕДЕНИЕ

В столкновениях тяжелых ядер при высоких энергиях рождается большое количество свободных нейтронов, которые несут важную информацию о механизме ядро-ядерного взаимодействия и эволюции образующейся ядерной системы. Такие нейтронные данные имеют высокую значимость для проверки и развития теоретических моделей и кодов. Однако, несмотря на важность таких исследований, к настоящему времени имеется крайне ограниченное число работ, посвященных измерению энергетических спектров и выходов нейтронов в ядро-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях. Прежде всего, это связано с большими методическими трудностями при проведении таких исследований.

Для экспериментального изучения спектров нейтронов в широком диапазоне энергий (от единиц МэВ до нескольких ГэВ) наилучшим методом является метод времени пролета. Спектрометры, созданные в различных научных центрах, имеют пролетные расстояния

несколько метров [1], а их размещение требует наличия экспериментальной зоны большого размера.

Нашей целью является создание компактного времяпролетного спектрометра с пролетным расстоянием примерно на порядок меньше используемого в традиционных спектрометрах для измерения спектров нейтронов в области энергий от 1 до 200 МэВ. Компактность спектрометра позволяет существенно увеличить скорость набора статистики событий и уменьшить вклад фона вторичных нейтронов. Спектрометр входит в состав установки BM@N [2] на выведенном пучке ядер ускорителя Нуклотрон с энергией 2–4 А ГэВ, он предназначен для исследования эмиссии нейтронов в области больших углов при ядроядерных столкновениях, что соответствует области распада спектров ядер мишени.

2. КОНЦЕПЦИЯ СПЕКТРОМЕТРА

Для получения надежных данных в измерениях двойных дифференциальных сечений образований нейтронов необходимо было выполнить целый ряд требований к создаваемому спектрометру, основные из которых таковы:

- малое пролетное расстояние (несколько десятков сантиметров) при высоком временном разрешении ($\sigma_t \approx 100\text{--}150$ пс),
- эффективная дискриминация заряженных частиц и гамма-квантов,
- малый вклад от фоновых нейтронов,
- способность работать в сильном магнитном поле большого анализирующего магнита BM@N,
- пособытийная запись данных вместе с данными других детекторов установки BM@N.

В спектрометре имеются четыре плеча, расположенных под различными углами к направлению пучка, в состав которых входят сцинтилляционный вето-детектор для дискриминации заряженных частиц VD и нейтронный детектор ND. Схематичный вид спектрометра в составе установки BM@N показан на рис. 1. Детектор ND1 расположен на расстоянии 20 см от мишени, он используется для измерения изотропной низкоэнергетической части спектра нейтронов. Другие три детектора (ND2 – ND4) находятся на расстоянии 30 см, они измеряют спектр нейтронов в интервале энергий 2–200 МэВ.

Рис. 1. Схематичный вид нейтронного спектрометра на канале эксперимента BM@N...

Необходимость использования малого пролетного расстояния, с одной стороны, объясняется размещением детекторов спектрометра в ограниченном пространстве внутри магнита BM@N, а с другой, – это позволяет проводить измерения на высокой интенсивности пучка ядер (порядка 10^6 ядер за сброс длительностью 2–3 с) и обеспечить сравнительно низкий вклад фона вторичных нейтронов. Для уменьшения фона, вызванного взаимодействием ядер пучка с воздухом, сцинтилляторы пучковых детекторов VC1, VC, VC2 и мишень расположены

внутри вакуумной трубы пучка. Типичный размер профиля пучка на мишени, имеющего гауссову форму, составляет $\sigma_x \approx \sigma_y \approx 3$ мм.

Стартовым детектором является пучковый детектор BC2 с пластиковым сцинтиллятором BC400B толщиной 150 мкм, просматриваемый двумя фотоэлектронными умножителями на основе микроканальных пластин XPM85112 (Photonis). Собственное временное разрешение этого детектора $\sigma_{start} = 40$ пс. Нейтронные детекторы генерируют стоп-импульс.

Для регистрации нейтронов в детекторах ND1–ND4 используется стильбен, позволяющий применить метод дискриминации гамма-квантов по форме импульса (PSD-метод).

Способность спектрометра работать в магнитном поле $B = 0.9$ Тл магнита BM@N достигается путем использования SiPMs вместо ФЭУ в детекторах ND и VD.

Важной особенностью спектрометра является реализация пособытийной записи информации с детекторов спектрометра путем ее оцифровки, что значительно расширяет возможности анализа данных совместно с данными от других детекторов установки BM@N.

В нейтронных измерениях для записи событий применяется триггер ядро-ядерных взаимодействий эксперимента BM@N, использующий импульсы от быстрых сцинтилляционных пучковых детекторов BC1, VC, BC2, FD и многоканального детектора BD, внутри которого размещена мишень. Эти импульсы поступают на входы специализированного модуля T0U с программируемой логикой [3], который генерирует сигнал триггера взаимодействия при выполнении следующих условий:

- наличие импульсов с амплитудой, соответствующей налетающему иону, в пучковых сцинтилляционных детекторах BC1 и BC2(T0), расположенных перед мишенью,
- отсутствие импульса в сцинтилляционном вето-счетчике VC с отверстием, формирующим пятно пучка на мишени,
- отсутствие импульса с амплитудой, соответствующей налетающему иону, в сцинтилляционном детекторе ядерных фрагментов FD позади мишени,
- число импульсов от сцинтилляционных стрипов детектора BD (Barrel Detector), имеющего вид цилиндра и расположенного вокруг мишени, превышает установленное пороговое значение N_{th} .

Выполнение первого и второго условий формирует триггер по налетающему иону (Beam Trigger, BT), а логика выработки триггера взаимодействия (Interaction Trigger, IT) записывается следующим образом:

$$IT = BT \cdot FD_{veto} \cdot BD(N > N_{th}). \quad (1)$$

Описанный триггер отбора событий отсекает часть периферических столкновений с большим прицельным параметром. Поскольку среднее число сработавших каналов детектора

VD возрастает при переходе от периферических к центральным столкновениям ядер, повышение порога N_{th} означает регистрацию все более центральных столкновений.

3. ДЕТЕКТОРЫ И ЭЛЕКТРОНИКА

Нейтронные детекторы имеют прямоугольный алюминиевый корпус, внутри которого находятся два идентичных кристалла стильбена в стандартной упаковке со стеклянным окном. Каждый кристалл стильбена просматривается сборкой из четырех SiPM (SensL 6×6 мм², J-ser.), импульсы от которых поступают на плату front-end-электроники (FEE). Быстрый выход *Fast pulse* используется для времяпролетных измерений в качестве стоп-сигнала, а медленный выход *Full pulse* передает полную форму импульса и применяется для разделения по форме импульса событий, вызванных нейтронами и гамма-квантами. Схема и внешний вид детекторов показаны на рис. 2, полная схема нейтронного канала приведена на рис. 3.

Рис. 2. Схема плеча спектрометра VD + ND и вид нейтронных детекторов ND.

Рис. 3. Схема нейтронного канала считывания...

Формирование быстрого временного импульса осуществляется путем использования быстрого выхода кремниевых фотоумножителей, а для полного импульса применяется медленный выход.

В нейтронном детекторе ND1 используются стильбены диаметром 30 мм и толщиной 10 мм, в детекторах ND2–ND4 – стильбены диаметром и толщиной 25.4 мм.

В вето-детекторах VD используется пластический сцинтиллятор $80 \times 40 \times 5$ мм³, просматриваемый двумя SiPM.

Каждое плечо спектрометра имеет пять независимых каналов регистрации, по два канала на каждый стильбен и один канал для детектора VD.

Для записи событий с нейтронных и вето-детекторов использовались электронные модули TQDC16VS [4] в стандарте VME. Эти модули входят в систему сбора данных установки BM@N, они выполняют оцифровку времени и формы входного сигнала. Модуль TQDC16VS содержит 16 входов для аналоговых сигналов с диапазоном входных импульсов ± 1 В, время-цифровой преобразователь с шагом регистрации времени 25 пс и амплитудно-цифровой преобразователь, осуществляющий непрерывную оцифровку амплитуды с разрядностью квантования 14 бит и частотой дискретизации 125 МГц. Модуль также имеет четыре программируемых входа/выхода синхронизации (50Ω LVTTTL) и интерфейс передачи данных по сети Ethernet со скоростью 1 или 10 Гб/с.

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Эффективность регистрации нейтронов в исследуемом интервале энергий 1–200 МэВ вычислялась путем моделирования, для этого использовался код Geant4 + CENDL 3.1, который тестировался в работе [5], а также в данной работе — с использованием результатов измерений эффективности нейтронных детекторов на основе органических сцинтилляторов [5–10]. Полученные отклонения расчетных значений от измеренных величин не превышают 5% и 10% в областях ниже и выше 8 МэВ соответственно. Рассчитанные эффективности нейтронных детекторов ND1 и ND2 – ND4 для двух порогов регистрации 1 и 3 МэВ соответственно показаны на рис. 4.

Рис. 4. Эффективность детектора на основе стильбена диаметром 25.4 мм и толщиной ...

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРОМЕТРА

Исследование характеристик нейтронного спектрометра проводилось в составе установки BM@N в эксперименте на пучке ядер ^{124}Xe с энергией 3.8 АГэВ, бомбардировавших мишень CsI, толщина которой была выбрана таким образом, чтобы вероятность неупругого взаимодействия падающего ядра пучка с ядрами мишени составляла 2%. Нейтронные детекторы были расположены под углами 110° (ND1) и 121°, 110°, 95° (соответственно ND2, ND3, ND4). При анализе результатов измерений применялся отбор событий с одним налетающим ионом пучка в интервале времени ± 1.5 мкс.

1.1. Временное и энергетическое разрешения

Временное разрешение оценивалось по ширине пика мгновенных гамма-квантов во времяпролетном спектре. При этом для улучшения временного разрешения проводилась коррекция зависимости времени регистрации от амплитуды импульса (slewing correction). В результате полученное временное разрешение времяпролетного спектрометра составило $\sigma_t \approx 120$ пс при пороговой энергии нейтронов 1 МэВ. Это соответствует временному разрешению самих нейтронных детекторов $\sigma_{det} \approx 112$ пс.

Энергетическое разрешение спектрометра для энергии нейтронов E определяется погрешностью пролетного расстояния σ_l и временным разрешением σ_t , оно вычисляется по формуле

$$\frac{\sigma_E}{E} = \gamma(\gamma + 1) \left[\left(\frac{\sigma_l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где γ – гамма-фактор, l – пролетное расстояние, t – время пролета нейтрона [1].

Полученное энергетическое разрешение для детекторов ND2 – ND4 в зависимости от энергии нейтронов для пролетного расстояния 30 см показано на рис. 5. При максимальной энергии исследуемого диапазона, равной 200 МэВ, оно составляет около 18%.

Рис. 5. Энергетическое разрешение на пролетном расстоянии 30 см для детекторов ND2 – ND4

1.2. Дискриминация гамма-квантов

Для выделения событий, вызванных нейтронами, необходимо подавить фоновые события, связанные с регистрацией гамма-квантов. Для этого в спектрометре применяется метод дискриминации по форме импульса (PSD). В нашем случае, где оцифровка формы импульса осуществляется с помощью модуля TQDC16VS, лучший результат достигается при использовании интервалов интегрирования 120 нс и 1.5 мкс для быстрой компоненты Q_{fast} и полного импульса Q_{total} соответственно. Для оценки качества разделения событий от нейтронов и гамма-квантов принято использовать параметр PSD, вычисляемый по следующей формуле:

$$PSD = \frac{Q_{fast}}{Q_{total}}, \quad (3)$$

а также величину FOM (Figure of Merit), которая численно оценивает качество разделения для данной энергии и определяется как отношение разности средних значений пиков нейтронов μ_n и гамма-квантов μ_γ к сумме значений их ширины на полувысоте (FWHM):

$$FOM = \frac{|\mu_\gamma - \mu_n|}{FWHM_\gamma + FWHM_n}. \quad (4)$$

Качество n/γ -разделения, полученное в настоящей работе, показано на рис. 6.

Рис. 6. Разделение событий по форме импульса, вызванных нейтронами и гамма-квантами в детекторе ND4 (а), и качество разделения событий от нейтронов и гамма-квантов (б)...

Для амплитуды, соответствующей пороговой энергии 1 МэВ, величина FOM для детекторов ND2–ND4 лежит в интервале 2.17–2.47, а для детектора ND1 она составляет 1.98. В области низких амплитуд полученные значения FOM превышают результаты большинства групп [10–15], исследовавших характеристики нейтронных детекторов на основе стильбена и SiPM.

Времяпролетные спектры нейтронов и фоновых гамма-квантов, измеренные детектором ND4 под углом 95° , показаны на рис. 7. Хорошо видно, что фон гамма-квантов значительно превышает спектр нейтронов в изучаемом интервале времени пролета. Это доказывает важность применения PSD-метода для выделения нейтронных событий. Полученные в настоящей работе значения параметра FOM позволяют практически полностью подавить фон гамма-квантов, следствием чего является отсутствие пика мгновенных гамма-квантов во времяпролетном спектре нейтронов.

Рис. 7. Сравнение времяпролетного спектра нейтронов и фона детектируемых гамма-квантов, измеренных детектором ND4 под углом 95°

1.3. Фон вторичных нейтронов

Нейтронный фон состоит из двух компонент, имеющих разное происхождение. Это фон от случайных нейтронов с равномерным распределением на временной шкале и фон вторичных

нейтронов, который коррелирован с прохождением ионов пучка через зону эксперимента BM@N. При этом вторая компонента состоит, в свою очередь, из нейтронов от взаимодействия ионов с материалами пучкового тракта и вторичных нейтронов, вызванных взаимодействием рожденных в мишени частиц с окружающими материалами.

Детекторы нейтронного спектрометра находятся внутри большого магнита BM@N установки, что определенным образом влияет на фоновые условия. Измерения показали, что фон случайных нейтронов практически отсутствует во времяпролетных спектрах. Это хорошо видно из представленного на рис. 8 двумерного распределения нейтронов, зарегистрированных детектором ND3, где горизонтальная шкала показывает время пролета, а вертикальная – интеграл быстрой компоненты импульса. Видно, что как перед спектром, так и в области больших времен ($t > 150$ нс) фоновые события практически отсутствуют.

Рис. 8. Распределение нейтронов, зарегистрированных детектором ND3...

Фон от нейтронов, рожденных при взаимодействии ионов с материалами пучкового тракта, изучался при измерении без мишени. На рис. 9 показаны времяпролетные спектры нейтронов, измеренные с мишенью CsI и без нее. Как видно на рисунке, вклад таких нейтронов является пренебрежимо малым (менее 1%).

Рис. 9. Времяпролетные спектры нейтронов, измеренные с детектором ND4...

Основным источником фоновых вторичных нейтронов является взаимодействие рожденных в мишени частиц с окружающими материалами – деталями детектора BD и других детекторов установки BM@N, а также материалами магнита. Из-за ограниченного пространства и использования малых пролетных расстояний реализовать измерения с теневым конусом для экспериментальной оценки величины этого фона не представляется возможным. Поэтому вклад таких фоновых нейтронов в измеряемый времяпролетный спектр оценивался путем моделирования – с использованием кода Geant4 [16, 17]. В качестве генератора событий ядерно-ядерного взаимодействия применялся код DCM-QGSM-SMM [18]. Моделирование показало, что наибольший вклад в области малых времен вносят нейтроны от взаимодействия высокоэнергетических частиц с материалами детектора BD, а в области больших времен доминирует вклад фоновых нейтронов от взаимодействий с окружающими спектрометр материалами.

На рис. 10 показаны времяпролетные спектры нейтронов, измеренные детекторами ND1 и ND4 с порогом регистрации 1 МэВ. Также на рисунке приведены вклады фоновых нейтронов, оцененные путем моделирования.

Рис. 10. Времяпролетные спектры нейтронов, измеренные с детекторами ND1 и ND4.

Основной вклад фона в измеренное распределение приходится на область спектра, соответствующую энергиям нейтронов несколько МэВ. При этом для детектора ND1,

имеющего самое малое пролетное расстояние, вклад фоновых нейтронов является наименьшим.

Следует отметить важность высокого временного разрешения спектрометра и использования малых пролетных расстояний для минимизации вклада фоновых нейтронов и получения достоверных результатов измерений. Поэтому компактность созданного нейтронного спектрометра имеет принципиальное значение.

1.4. Энергетические спектры нейтронов

Энергетические спектры нейтронов представляют собой двойные дифференциальные сечения образования нейтронов, они получаются после вычета фона вторичных нейтронов с использованием выражения

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = \frac{\Delta N}{\Delta E \Delta\Omega \varepsilon(E) n I k_1 k_2}, \quad (5)$$

где ΔN – число событий в интервале энергий ΔE , $\Delta\Omega$ – телесный угол, $\varepsilon(E)$ – эффективность детектора при энергии нейтронов E , n – число ядер мишени на 1 см^2 , I – число ионов пучка на мишень, k_1 – поправка на мертвое время спектрометра, k_2 – поправка, учитывающая отбор событий с одним налетающим ионом пучка во временном интервале ± 1.5 мкс.

В качестве примера на рис. 11 показаны предварительные результаты измерений энергетических спектров нейтронов в области разных углов детекторами ND1 – ND4.

Рис. 11. Энергетические спектры нейтронов в области углов 95° , 110° и 121° , измеренные детекторами ND1 – ND4 (предварительные результаты)

Как видно на рисунке, в измерениях получены данные с хорошей статистикой во всем диапазоне энергий. Спектры хорошо согласуются в области низких энергий, что свидетельствует об изотропном испускании таких нейтронов. Различие становится заметным с увеличением энергии нейтронов (в области выше 20 МэВ).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан компактный времяпролетный спектрометр нейтронов на базе установки VM@N для измерения энергетических спектров нейтронов в интервале энергий 1–200 МэВ в области больших углов. Выполненный эксперимент по измерению двойных дифференциальных сечений рождения нейтронов в Xe+CsI-столкновениях при энергии 3.8 АГэВ на канале установки VM@N показал, что созданный спектрометр полностью реализует предъявляемые к нему требования. Для нейтронных детекторов на основе стильбена, состыкованного со сборкой из четырех SiPM, достигнуто временное разрешение $\sigma_t \approx 112 \pm 2$ пс. Это позволяет выполнять измерения энергетических спектров нейтронов в широком интервале энергий на малых пролетных расстояниях (около 30 см). Использование метода n/γ -дискриминации по форме

импульса с величиной фактора FOM более 2 позволяет практически полностью подавить фон гамма-квантов и обеспечить надежное выделение нейтронных событий.

Дальнейшее использование спектрометра в составе установки BM@N направлено на изучение эмиссии нейтронов в ядро-ядерных столкновениях на пучках различных ядер с энергией от 2 до 4 АГэВ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юревич В.И.* // ЭЧАЯ. 2012. Т. 43. С. 711. <https://elibrary.ru/item.asp?id=50503398>
[Yurevich V.I., Phys. Part. Nucl. 2012. V. 43. P. 367].
2. *Afanasiev S., Agakishiev G., Aleksandrov E. et al. (BM@N Collaboration).* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2024. V. 1065. P. 169532. <http://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169532>
3. *Grigoryev P.N., Lashmanov N.A., Rogov V.Yu., Sedykh S.A., Sergeev S.V., Yurevich V.I.* // Phys. Part. Nucl. Lett., 2025. V. 22. P. 397. <https://doi.org/10.1134/S1547477124702509>
4. TQDC16VS. 16-channel discriminator, multi-hit time-stamping TDC and waveform digitizer. Электронный ресурс. <https://afi.jinr.ru/TDC> (дата обращения: 10.02.2026).
5. *Garcia A.R., Mendoza E., Cano-Ott D. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. A. 2017. V. 868. P. 73. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.06.021>
6. *Howe S.D., Lisowski P.W., Russell G.J., King N.S.P., Donnert H.J.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1984. V. 227. P. 565. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(84\)90216-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(84)90216-X)
7. *Fowler J.L., Cookson J.A., Hussain M. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. 1980. V. 175. P. 449. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(80\)90759-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(80)90759-4)
8. *Amian W.B., Meier M.M., Byrd R.C., Goulding C.A., Morgan G.L., Moss C.E.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1992. V. 313. P. 452. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(92\)90823-M](https://doi.org/10.1016/0168-9002(92)90823-M)
9. *Leray S., Borne F., Crespin S. et al.* // Phys. Rev. C. 2002. V. 65. P. 044621. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.65.044621>
10. *Boxer B., Godfrey B., Grace C., Johnson J., Khandwala R., Tripathi M.* // J. Instrum. 2023. V. 18. P. P01020. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/01/P01020>
11. *Chergui A.C., Popova E.V., Stifutkin A.A. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1689. P. 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1689/1/012039>

12. *Preston M., Eberhardt J.E., Tickner J.R.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2014. V. 61. P. 2410.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2335208>
13. *Ruch M., Flaska M., Pozzi S.A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2015. V. 793. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.04.053>
14. *C. Wysotzki*, “Pulse Shape Discrimination with SiPMs and Stilbene Crystals for Neutron Imaging,” Master’s thesis, III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2018, 66 p.
15. *Boo J., Hammig M.D., Jeong M.* // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 3826.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-83530-4>
16. *Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2003. V. 506. P. 250. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
17. *Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2016. V. 835. P. 186. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
18. *Базнат М., Ботвина А., Мусульманбеков Ж., Тонеев В., Жежер В.* // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 3. С. 265. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43040889>
[*Baznat M., Botvina A., Musulmanbekov G., Toneev V., Zhezher V.* Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. P. 303. <https://doi.org/10.1134/S1547477120030024>]

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схематичный вид нейтронного спектрометра на канале эксперимента BM@N: ND1–ND4 – нейтронные детекторы, VD – вето-детекторы; BC1, VC, BC2, FD – пучковые сцинтилляционные детекторы; BD – многоканальный сцинтилляционный детектор.
- Рис. 2.** Схема плеча спектрометра VD + ND и вид нейтронных детекторов ND.
- Рис. 3.** Схема нейтронного канала считывания: SiPM – сборка из четырех кремниевых фотоумножителей, S – формирователь формы импульса путем дифференцирования, A1 – быстрый усилитель, A2 – трансимпедансный усилитель.
- Рис. 4.** Эффективность детектора на основе стильбена диаметром 25.4 мм и толщиной 25.4 мм, рассчитанная при двух значениях порога (1 и 3 МэВ) с помощью кода Geant4 + CENDL 3.1.
- Рис. 5.** Энергетическое разрешение на пролетном расстоянии 30 см для детекторов ND2–ND4.
- Рис. 6.** Разделение событий по форме импульса, вызванных нейтронами и гамма-квантами в детекторе ND4 (а), и качество разделения событий от нейтронов и гамма-квантов (б) при энергии нейтронов 1 ± 0.1 МэВ (соответствует вертикальной штриховой линии на рис. а).
- Рис. 7.** Сравнение времяпролетного спектра нейтронов и фона детектируемых гамма-квантов, измеренных детектором ND4 под углом 95° .
- Рис. 8.** Распределение нейтронов, зарегистрированных детектором ND3, штриховая линия показывает пороговое значение величины Q_{fast} , она соответствует пороговой энергии 1 МэВ, стрелка указывает значение времени пролета для этой энергии нейтронов.
- Рис. 9.** Времяпролетные спектры нейтронов, измеренные с детектором ND4: чистое распределение – измерение с мишенью CsI, темное распределение – измерение без мишени.
- Рис. 10.** Времяпролетные спектры нейтронов, измеренные с детекторами ND1 и ND4. Темные области показывают вклад фоновых нейтронов.
- Рис. 11.** Энергетические спектры нейтронов в области углов 95° , 110° и 121° , измеренные детекторами ND1 – ND4 (предварительные результаты).

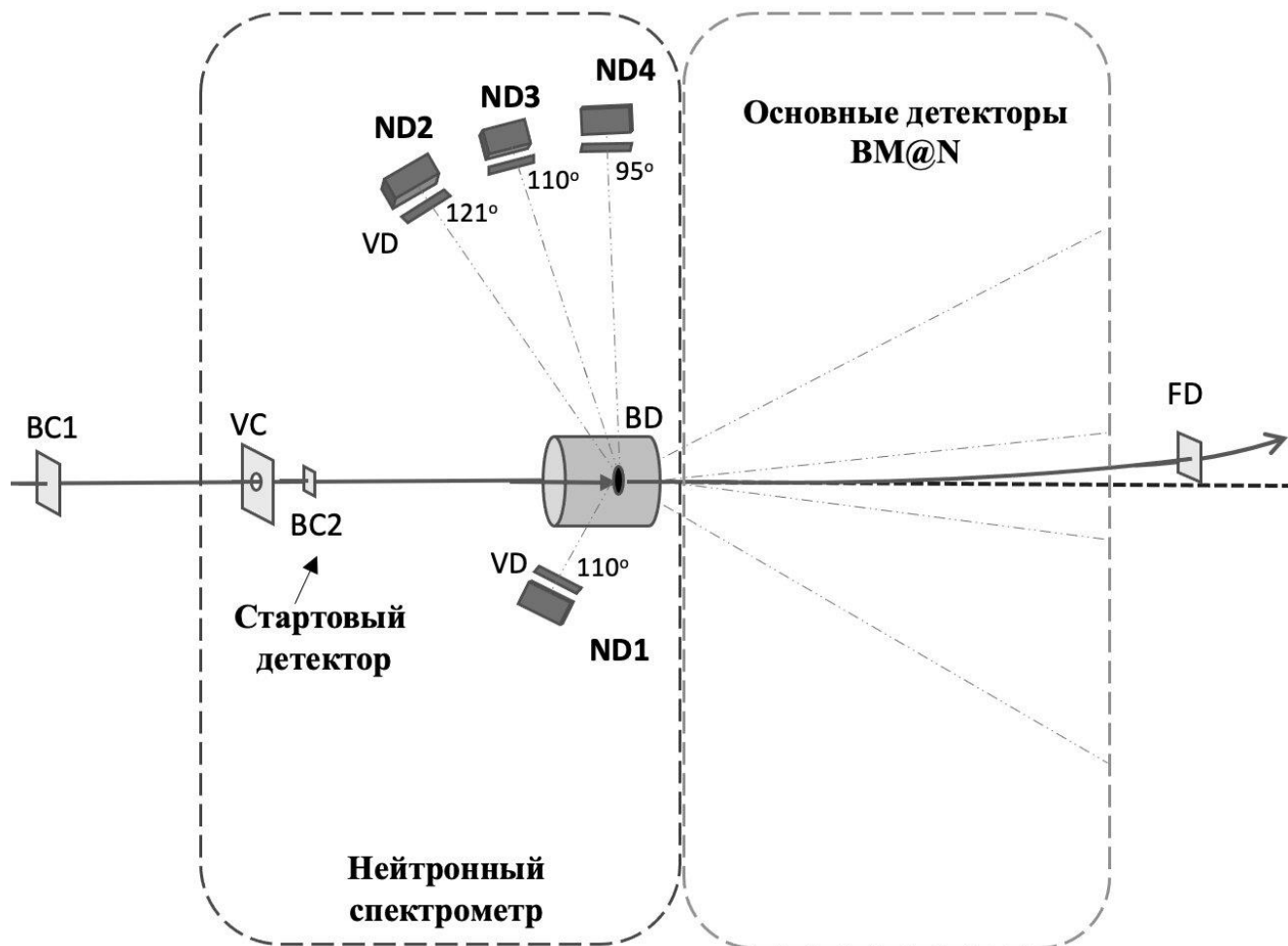


Рис. 1.

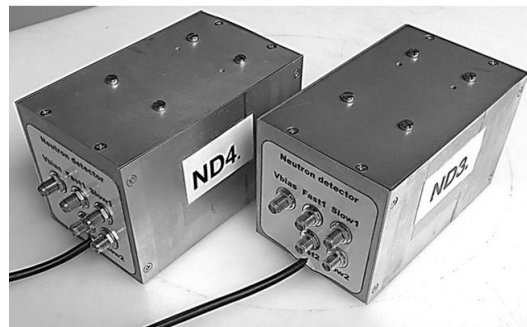
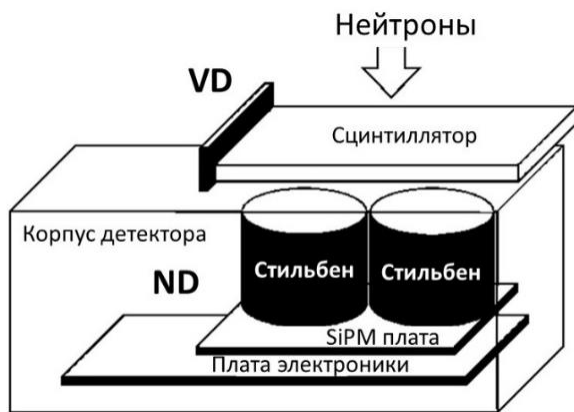


Рис. 2.



Рис. 3.

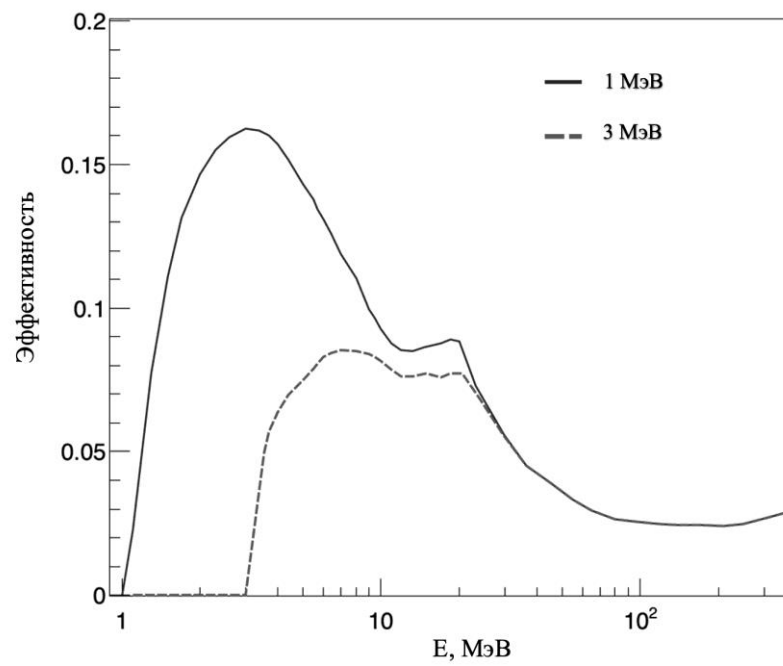


Рис. 4.

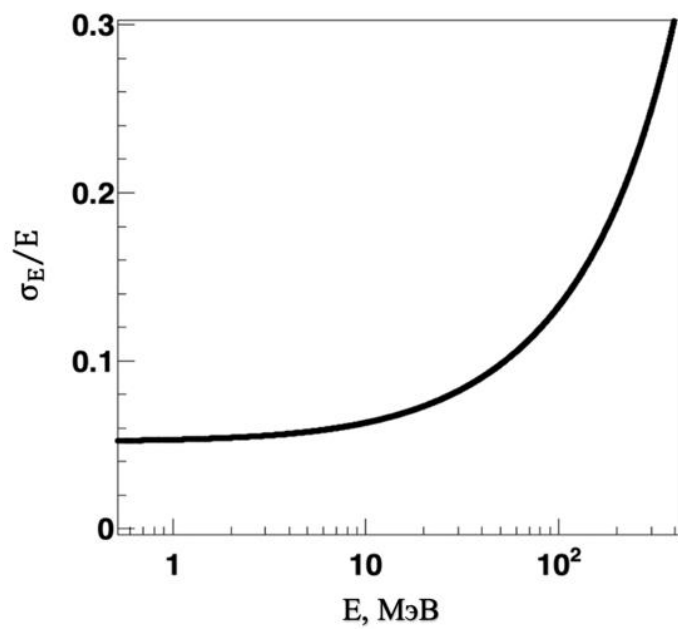
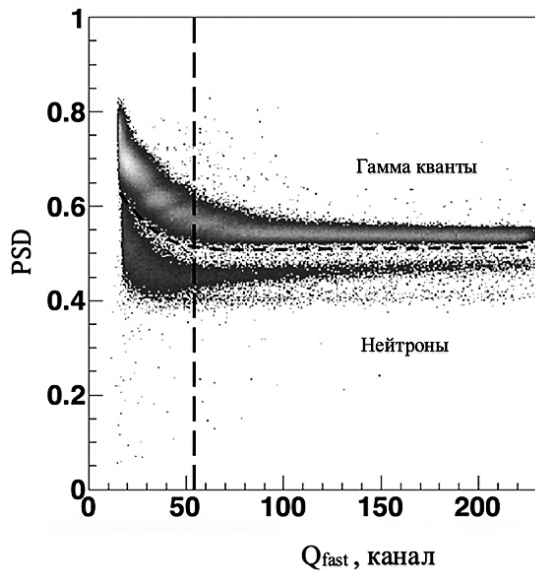
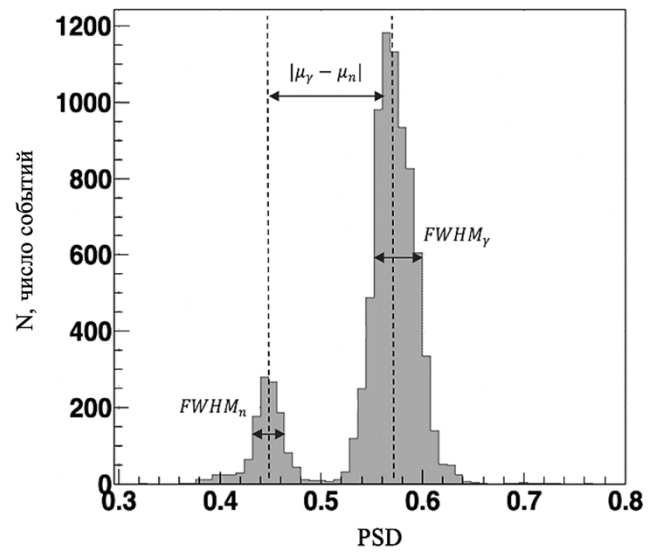


Рис. 5.



(a)



(б)

Рис. 6.

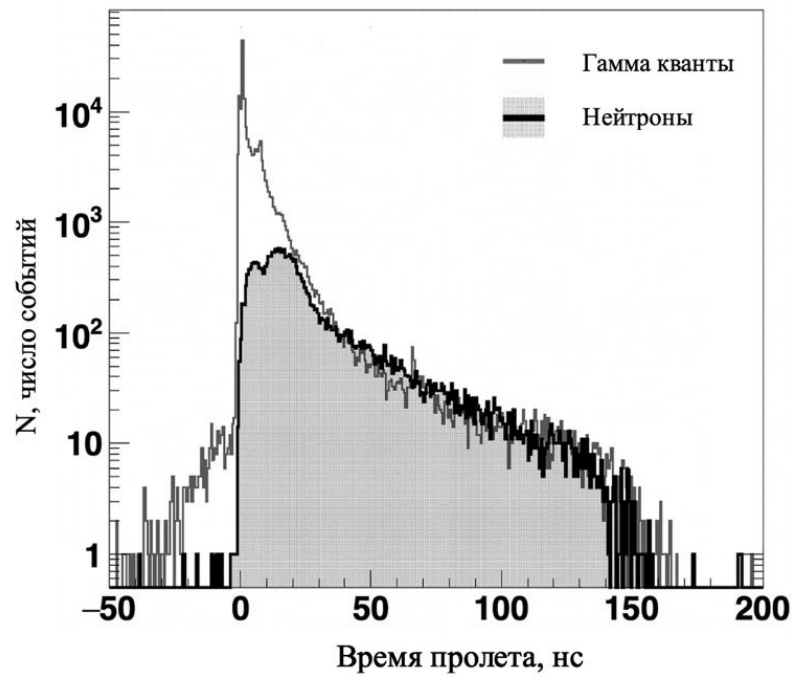


Рис. 7.

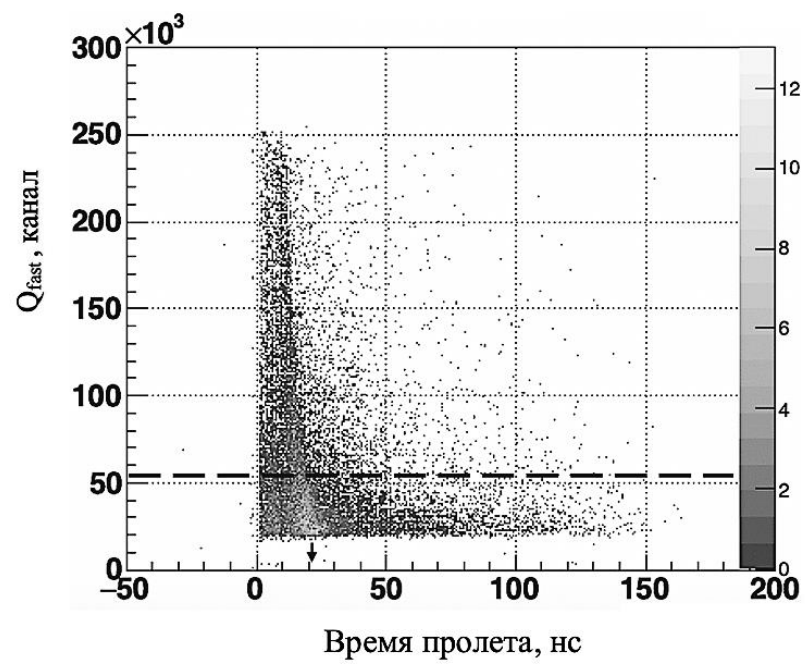


Рис. 8.

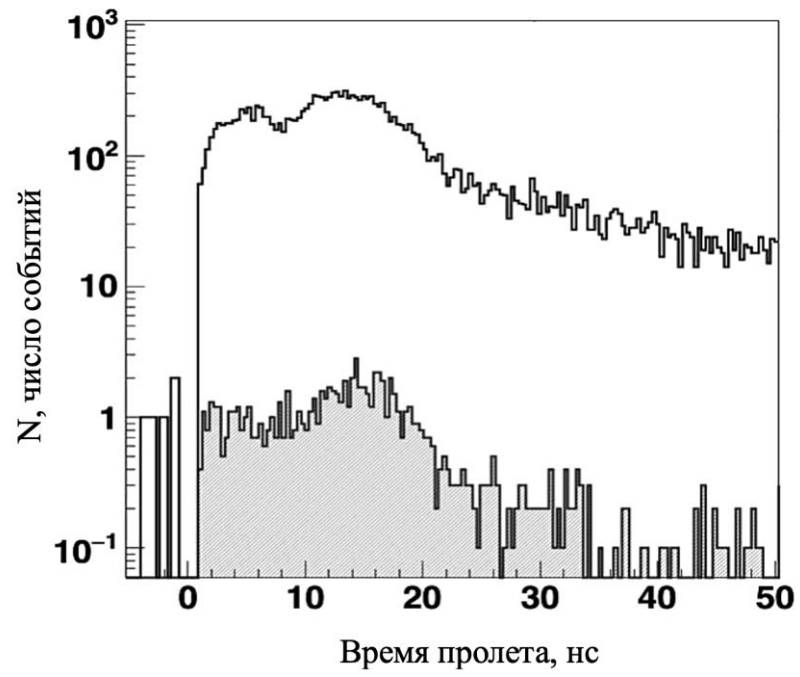


Рис. 9.

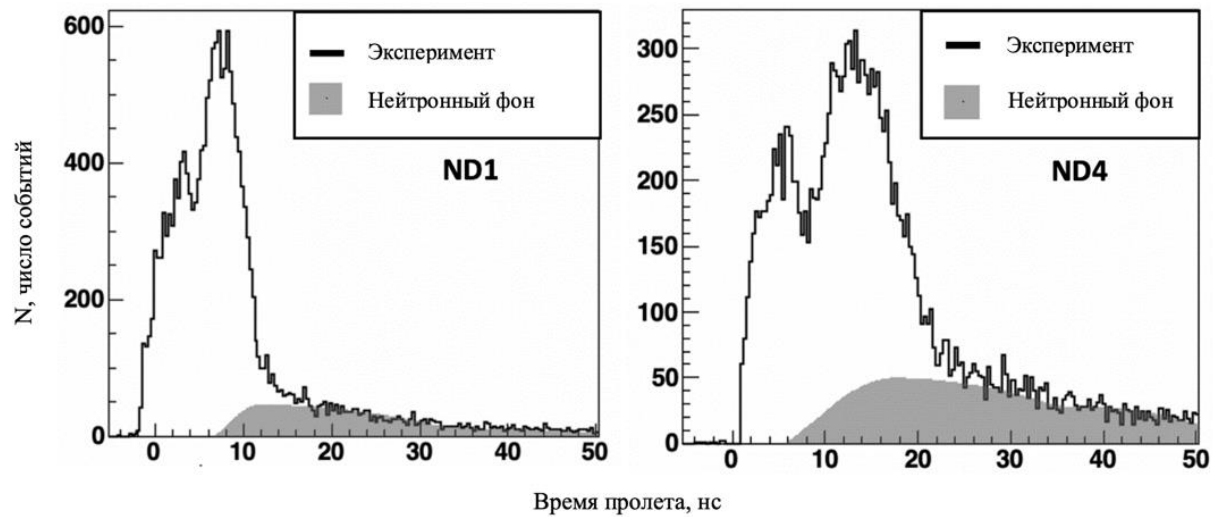


Рис. 10.

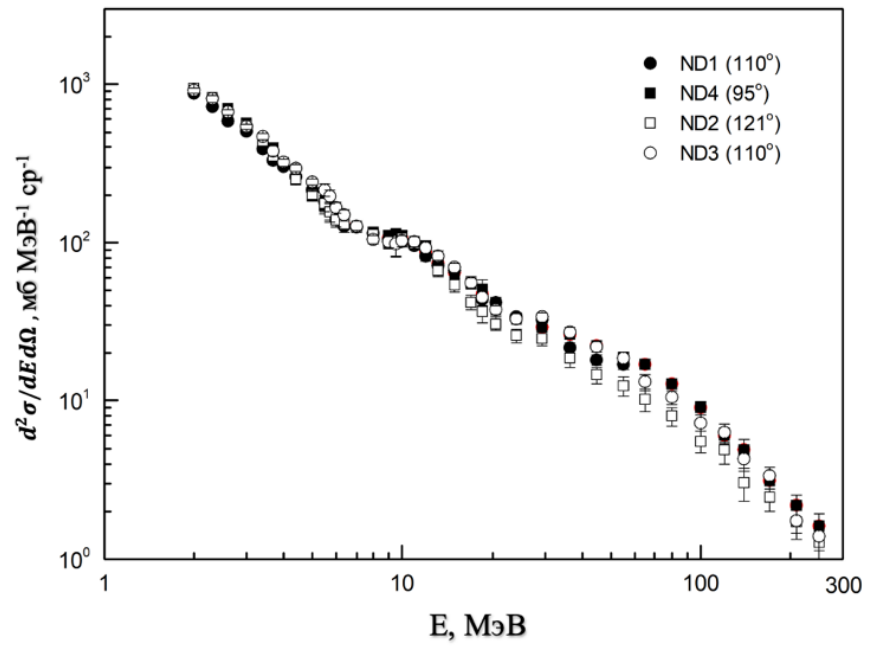


Рис. 11.