

УДК 539.1.074.8

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С КРЕМНИЕВЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ EQR-15 ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ВМ@N

© 2024 г. Ф. Ф. Губер^а, А. П. Ивашкин^а, Н. М. Карпушкин^{а,*},
А. И. Махнев^а, С. В. Морозов^а, Д. В. Серебряков^а,
В. А. Басков^б, В. В. Полянский^б

^аИнститут ядерных исследований Российской академии наук
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

^бФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

*e-mail: karpushkin@inr.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023 г.

После доработки 20.09.2023 г.

Принята к публикации 19.10.2023 г.

Уравнение состояния плотной ядерной материи содержит член, характеризующий изоспиновую (протон-нейтронную) асимметрию. Для исследования зависимости этого члена от плотности ядерной материи необходимо, помимо азимутальной асимметрии потоков заряженных частиц, измерять и азимутальную асимметрию потоков нейтронов, образующихся в плотной ядерной среде в процессе ядро-ядерных столкновений. Для этой цели в ИЯИ РАН разрабатывается высокогранулированный времяпролетный детектор нейтронов, который будет использоваться в эксперименте ВМ@N на выведенном пучке ускорителя “Нуклотрон” в ОИЯИ (Дубна). Этот детектор будет идентифицировать нейтроны и измерять их энергии в реакциях столкновений тяжелых ядер с энергиями до 4 ГэВ на нуклон. Приводятся результаты измерений временного разрешения и световых выходов образцов сцинтилляционных детекторов, которые будут использоваться в нейтронном детекторе. Данные образцы изготовлены на основе наиболее доступного в настоящее время быстрого пластикового сцинтиллятора производства ОИЯИ размерами $40 \times 40 \times 25 \text{ мм}^3$. Считывание света осуществляется при помощи фотоприемника EQR15 11-6060D-S. Полученные результаты сравниваются с результатами измерений для детектора такого же размера с быстрым сцинтиллятором EJ230 и тем же типом фотоприемника. Измерения выполнены на космических мюонах и на пучке электронов синхротрона “Пахра” (ФИАН, Троицк).

DOI: 10.31857/S0032816224030021 EDN: OWADJM

1. ВВЕДЕНИЕ

Программа исследований в рамках эксперимента ВМ@N (Baryonic Matter at Nuclotron) на выведенных пучках тяжелых ионов ускорителя “Нуклотрон” в ОИЯИ (Дубна) включает в себя изучение уравнения состояния сверхплотной ядерной материи, которая образуется в столкновениях тяжелых ионов с фиксированной

мишенью при энергиях налетающих ионов до 4 ГэВ на нуклон [1, 2]. Уравнение состояния плотной ядерной материи содержит член, характеризующий изоспиновую (протон-нейтронную) асимметрию, называемый энергией симметрии [3]. Для изучения зависимости энергии симметрии от плотности ядерной среды, необходимо, помимо измерений азимутальной асимметрии потоков заряженных

частиц, измерять и потоки нейтронов, образующихся в ядро-ядерных столкновениях. Как было показано в единственном эксперименте по столкновению ионов золота при энергии 400 МэВ на нуклон, проведенном в GSI более 10 лет назад [4], уравнение состояния ядерной материи при нормальной ядерной плотности чувствительно к отношению прямых и эллиптических потоков нейтронов к соответствующим потокам заряженных адронов с единичным зарядом.

Эксперимент BM@N имеет уникальную возможность измерить отношения потоков нейтронов и протонов при энергиях ядерных столкновений, в которых достигается ядерная плотность, в 2–4 раза превышающая обычную ядерную плотность, и которая уже сравнима с плотностью ядерной материи, образующейся при слиянии нейтронных звезд. Потоки протонов будут измеряться магнитным спектрометром BM@N, а для идентификации и измерения энергии нейтронов в ИЯИ РАН разрабатывается новый высоко-гранулированный времяпролетный детектор нейтронов HGND (Highly Granularity Neutron Detector) [5].

Расположение HGND в экспериментальном зале BM@N возможно на расстоянии не более 480 или 700 см от мишени. При такой небольшой времяпролетной базе временное разрешение активных элементов детектора должно быть на уровне 100–150 пс, чтобы обеспечить приемлемое разрешение по энергии детектируемых нейтронов с кинетическими энергиями вплоть до 4 ГэВ. Для этого в качестве активных элементов HGND были выбраны пластиковые сцинтилляторы размерами $40 \times 40 \times 25 \text{ мм}^3$, свет с которых детектируется одним кремниевым фотоумножителем с активной площадью $6 \times 6 \text{ мм}^2$. Общее количество таких сцинтилляционных детекторов в детекторе нейтронов составляет около 2000 штук и, конечно, при выборе материала сцинтиллятора и типа фотоприемника необходимо учитывать требования как к временному разрешению сцинтилляционных детекторов, так и к оптимизации их стоимости. Для этого уже были проведены тестовые измерения, выполненные на космических мюонах, и опубликованы результаты для ряда образцов сцинтилляционных детекторов, собранных из сцинтилляторов и кремниевых фотоприемников от различных производителей [6].

В данной статье приводятся результаты дальнейших измерений временного разрешения и световых выходов образцов сцинтилляционных детекторов на основе наиболее доступного в настоящее время быстрого пластикового сцинтиллятора, изготавливаемого в ОИЯИ, и использовании доступного в настоящее время фотоприемника EQR15 11-6060D-S [7]. Измерения выполнены на космических мюонах и на пучке электронов синхротрона “Пахра” (ФИАН, Троицк, Москва) [8]. Результаты измерений сравниваются с результатами измерений для образцов детектора с быстрым сцинтиллятором EJ230 [9] и тем же фотоприемником.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА КОСМИЧЕСКИХ МЮОНАХ

Для измерения временного разрешения сцинтилляционных детекторов были изготовлены несколько образцов размером $40 \times 40 \times 25 \text{ мм}^3$ со сцинтиллятором на основе полистирена с добавками 1.5% паратерфенила и 0.01% PPOP. Этот сцинтиллятор имеет время высвечивания $3.9 \pm 0.7 \text{ нс}$. Для сравнения временное разрешение было также измерено для образцов детекторов на основе более быстрого сцинтиллятора EJ-230 с временем высвечивания $2.8 \pm 0.5 \text{ нс}$ и такими же размерами. По центру одной из больших граней каждого сцинтиллятора устанавливался кремниевый полупроводниковый фотодетектор с чувствительной площадью $6 \times 6 \text{ мм}^2$. Оставшаяся поверхность этой грани была покрыта черной светопоглощающей лентой. Другие грани были покрыты белым диффузным отражателем на основе оксида титана TiO_2 . Сами фотодетекторы смонтированы на разработанных печатных платах, на которых размещался также и тракт предусилителя. Сцинтиллятор и плата помещались в светозащитный корпус, изготовленный из углепластика на 3D-принтере.

В качестве фотодетекторов были использованы появившиеся недавно на рынке новые быстрые кремниевые фотоприемники EQR15 11-6060D-S [5], которые имеют квантовую эффективность 45% и усиление порядка $4 \cdot 10^5$. Сигнал со сцинтилляционного детектора усиливался с помощью предусилителя на основе ОУ LMH6629MF (усиление 20 дБ, полоса 600 МГц

по уровню 3 Дб, шум менее $2.2 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$). Для регистрации времени срабатывания сигнал с предусилителя подавался на схему с быстрым дискриминатором (ADCMP553) с постоянным порогом, с выхода которого сформированный дифференциальный сигнал затем оцифровывался для дальнейшего анализа с помощью прецизионного (с точностью отсчета 200 пс) аналого-цифрового преобразователя CAEN DT5742. Собственное временное разрешение фотоприемника с усилителем было измерено с помощью облучения фотоприемника пикосекундным лазером. Измеренный разброс задержки между триггерным сигналом лазера и откликом фотоприемника составил 30–40 пс [6]. В качестве стартового (триггерного) детектора использовался микроканальный ФЭУ с радиатором из кварца толщиной 20 мм Photonis XR85012-FIT/Q, работающий как черенковский детектор [10]. Временное разрешение такого детектора составляло 22 пс. Сигнал от стартового детектора также оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя CAEN DT5742. Временное разрешение, измеренное на космических мюонах, для сцинтилляционного детектора с пластмассовым сцинтиллятором производства ОИЯИ и фотоприемником EQR15 11-6060D-S составило 125 пс, а временное разрешение для сцинтилляционного детектора со сцинтиллятором EJ-230 и тем же фотоприемником составило 105 пс.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ПУЧКЕ ЭЛЕКТРОНОВ УСКОРИТЕЛЯ “ПАХРА” (ФИАН, ТРОИЦК)

Для измерения временного разрешения образцов сцинтилляционных детекторов на пучке электронов была собрана установка (см. рис. 1). Пучок электронов синхротрона “Пахра” с энергией 300 МэВ выводится в экспериментальную зону, где собрана установка для проведения измерений. На оси пучка установлены вето-счетчик и два сцинтилляционных детектора 1 с поперечным размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и толщиной 5 мм, которые определяли размер пучка на исследуемых детекторах. Исследуемые сцинтилляционные детекторы 2 с установленными фотоприемниками 3 и быстрый триггерный детектор, состоящий из кварцевого радиатора 4 и микроканального ФЭУ 5, установлены дальше по пучку.

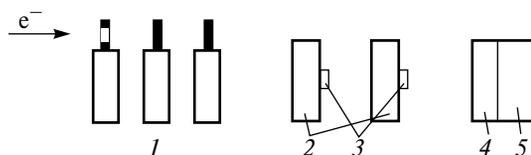


Рис. 1. Схема установки для измерения характеристик детекторов на пучке электронов ускорителя “Пахра” (ФИАН, Троицк): 1 — пучковые счетчики, 2 — образцы сцинтилляторов, 3 — фотодиоды, 4 — кварцевый черенковский радиатор, 5 — МСР ФЭУ.

Временное разрешение, измеренное на пучке электронов, для сцинтилляционного детектора с пластмассовым сцинтиллятором производства ОИЯИ и фотоприемником EQR15 11-6060D-S составило 117 пс, а временное разрешение для сцинтилляционного детектора со сцинтиллятором EJ-230 и тем же фотоприемником составило 74 пс. Спектры на рис. 2 представляют собой разницу во времени отсчетов компараторов для сигнала с фотодетектора и сигнала с быстрого триггерного черенковского счетчика МСР. Справа показан спектр, измеренный на пучке электронов, слева на том же рисунке для сравнения показан спектр, полученный для космических мюонов.

Также на пучке электронов для сцинтилляционных детекторов был измерен световой выход, выраженный в фотоэлектронах, для минимально ионизирующей частицы (МИП) по методике, описанной в [6]. Параметр, характеризующий зависимость разброса сигнала от его амплитуды, для фотоприемника EQR15 11-6060D-S дает коэффициент пересчета 1.8 мВ/фотоэлектрон по сравнению с предыдущими измерениями с фотоприемниками Hamamatsu и SensL, которые дали значения 0.47 мВ/ф.э. и 0.68 мВ/ф.э. соответственно [6]. При этом пик амплитуды для МИП-сигнала дает величину световыхода для детектора со сцинтиллятором JINR на уровне 158 ± 9 фотоэлектронов, а для детектора со сцинтиллятором EJ230 дает значение 292 ± 2 фотоэлектрона. Видно, что для сцинтиллятора EJ-230 световой выход больше почти в два раза, что также приводит к улучшению временного разрешения детектора с этим сцинтиллятором. При этом был также учтен эффект влияния формы сигнала на коэффициент пересчета. Измерения, проведенные по форме сигнала для сцинтиллятора производства ОИЯИ, показали, что отношение площади сигнала (заряда) к его

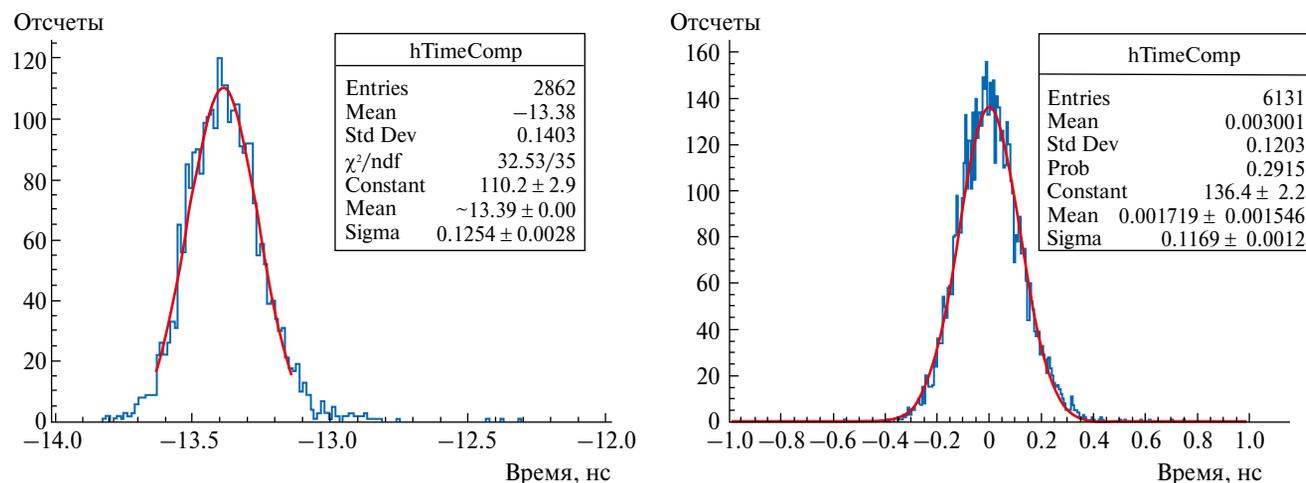


Рис. 2. Результаты измерения временного разрешения для сцинтилляционного детектора со сцинтиллятором ОИЯИ и фотодетектором EQR15 11-6060D-S на космических мюонах (слева) и пучке электронов (справа).

амплитуде составило 18.22, а для сцинтиллятора EJ-230 значение 18.01. Это дает неточность в измерении коэффициента пересчета на уровне 1.1%, что сравнимо с ошибкой измерения световых выходов по MIP-сигналу.

Были также проведены сканирования пучком электронов по поверхности сцинтилляторов. Результат тестирования разных точек поверхности сцинтиллятора производства ОИЯИ показал, что отношение световых выходов для частиц, проходящих через центр сцинтиллятора к световых выходов частиц, проходящих по краю сцинтиллятора, составляет 1.45, а временное разрешение при этом на краю ухудшается на 6%. Этим объясняется то, что на космических мюонах полученное временное разрешение немного хуже, чем полученное при измерениях на пучке электронов, так как в случае космических мюонов треки проходят равновероятно по всей поверхности сцинтиллятора, и значение временного разрешения представляет собой усредненное значение для всех точек поверхности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерено временное разрешение образцов сцинтилляционных детекторов на пучке электронов с энергией 300 МэВ на синхротроне “Пахра” (ФИАН, Троицк, Москва) для двух типов пластмассовых сцинтилляторов: сцинтиллятора отечественного производства ОИЯИ (Дубна) и сцинтиллятора EJ-230 с использованием в обоих случаях для считывания света

китайских фотоприемников EQR15 11-6060D-S. Применение отечественного сцинтиллятора производства ОИЯИ дает временное разрешение на уровне 120 пс, что укладывается в требования для конструируемого детектора нейтронов. Благодаря значительно более быстрому времени высвечивания сцинтиллятора EJ-230, временное разрешение сцинтилляционного детектора, изготовленного на его основе (75 пс), лучше, чем временное разрешение детектора, изготовленного на основе сцинтиллятора ОИЯИ, для проведенных измерений в одинаковых условиях на пучке электронов. Однако с учетом того, что стоимость сцинтиллятора EJ-230 выше, в качестве основного варианта в настоящее время предлагается использовать для HGND сцинтилляторы производства ОИЯИ, так как временное разрешение на уровне 100–150 пс вполне приемлемо для проведения исследований анизотропии потоков нейтронов в эксперименте VM@N.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в ИЯИ РАН и поддержана Российским научным фондом (грант № 22–12–00132).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M.* // JPS Conf. Proc. 2020. V. 32. P. 010093. <http://doi.org/10.7566/JPSCP.32.010093>
2. *Senger P. and on behalf of the VM@N collaboration.* // PoS CPOD2021. 2022. V. 400. P. 033. <http://dx.doi.org/10.22323/1.400.0033>

3. *Sorensen A., Agarwal K., Brown K.W., Chajecki Z., Danielewicz P. et al.* // Progress in Particle and Nuclear Physics. Available online 19 September 2023. 104080. <https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2023.104080>
4. *Russotto P., Wu P.Z., Zoric M. et al.* // Phys. Lett. 2011. V. 697. P. 471. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2011.02.033>
5. *Guber F., Finogeev D., Golubeva M., et al.* // High Energy Physics. In press. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.09610>
6. *Губер Ф.Ф., Ивашкин А.П., Карпушкин Н.М., Махнев А.И., Морозов С.В., Серебряков Д.В.* // ПТЭ. 2023. № 4. С. 36. <https://doi.org/10.31857/S0032816223030060>
7. Eqr15 series sipms. <http://www.ndl-sipm.net/PDF/Datasheet-EQR15.pdf>.
8. *Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A., Lvov A.I., Koltsov A.V., Krechetov Y.F., Malinovsky E.I., Pavlyuchenko L.N., Polyanskiy V.V., Sidorin S.S.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1390. P. 012127. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1390/1/012127>
9. E. Technology. <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-228-ej-230>.
10. *Karavicheva T.L. and on behalf of the ALICE Collaboration.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012186. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012186>