= ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА =

УДК 539.1.074.8

ПРОТОТИП КОЛЬЦЕВОГО НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА

© 2019 г. В. А. Басков^{*a*,*}, Б. Б. Говорков^{*a*}, В. В. Полянский^{*a*}

^а Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53 *e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru Поступила в редакцию 24.08.2018 г. После доработки 24.08.2018 г. Принята к публикации 29.09.2018 г.

При калибровке источником ионизирующего излучения ⁶⁰Со относительная эффективность регистрации полукольца прототипа нейтронного детектора с внутренним радиусом 50 мм плавно спадает с ~15% в центре полукольца до ~5% на торцах. При калибровке космическими мюонами относительная эффективность регистрации составляет около 100% по всему объему детектора. Сложная геометрическая форма детектора приводит к наличию зон с уменьшенной и увеличенной величиной эффективности.

DOI: 10.1134/S0032816219030030

Процесс фоторождения нейтральных пионов вблизи порога на нейтронах экспериментально до конца не изучен ($\gamma + n \rightarrow \pi^0 + n$). Исследование этого процесса предполагается выполнить специальной установкой с использованием выведенного пучка электронов и системой мечения фотонов на ускорителе "Пахра" в ФИАН [1–3].

Установка будет одновременно регистрировать все образующиеся в исследуемом процессе частицы: два фотона от распада нейтрального пиона и нейтрон. Определение энергии нейтрона должно быть осуществлено методом "времени пролета". В этом случае в качестве сигнала *Start* должен использоваться сигнал счетчиков системы мечения тормозных фотонов, в качестве сигнала *Stop* предполагается использовать сигнал от нейтронного детектора.

На основе моделирования методом Монте-Карло был проведен анализ характеристик установки, в частности углов регистрации вылетевшего из ядра нейтрона, энергии нейтрона ($2 \le E \le 12 \text{ M} \Rightarrow \text{B}$), точности ее определения.

Было определено, что нейтронный детектор должен был состоять из трех колец стандартного пластического сцинтиллятора с шириной и толщиной каждого кольца 50 мм. Внутренние радиусы колец должны составить 100, 150 и 200 мм соответственно. Каждое кольцо нейтронного детектора должно быть разбито на два полукольца, с которых должны были сниматься сигналы [4].

Предварительно для исследования характеристик кольцевого нейтронного детектора был создан прототип (рис. 1), состоящий из двух полуколец стандартного пластического сцинтиллятора на основе полистирола [5]. Ширина, толщина и внутренние радиусы обоих полуколец составляли 50 мм. Все грани полуколец, включая торцы, были отполированы и за исключением торцевых плоскостей обернуты алюминизированным майларом и черной бумагой. Сигналы снимались с обоих торцов двух полуколец с помощью фотоумножителей ФЭУ-85, плотно без смазки прижатых к граням сцинтилляторов. Использовались стандартные делители напряжения. Напряжение на всех делителях составляло ~1000 В.

Полукольца были получены из разрезанного по оси симметрии выточенного на токарном станке и впоследствии отполированного кольца сцинтиллятора. Одна грань (со стороны счетчика C_1) была разрезана перпендикулярно оси симметрии, а другая грань (сторона счетчика C_2) разрезана под углом $\delta \approx 1^\circ$ (вставка на рис. 1).

В данной работе представлены результаты исследований относительной эффективности регистрации нейтронного детектора є в зависимости от координаты попадания частицы в детектор.

Эффективность регистрации частиц нейтронным детектором ε исследовалась в диапазоне энергий комптон-электронов, генерируемых двумя γ -линиями радиоактивного источника ⁶⁰Со, а также в диапазоне энерговыделения, оставляемого в детекторе космическими мюонами, проходящими через детектор. В случае использования источника ⁶⁰Со триггерная система состояла из тонкого сцинтилляционного счетчика \emptyset 10 и толщиной 1 мм C_3 и коллиматора размером 80 × 80 × 5 мм с



Рис. 1. Схематический вид нейтронного детектора. \mathcal{J} и Π – левое и правое полукольца; C_1 и C_2 – счетчики левого полукольца; O – начало отсчета координат по оси X; $x_{\rm T}$ – "текущая" координата; O – начало отсчета по углу φ .

диаметром отверстия 8 мм, которые были расположены непосредственно над нейтронным детектором (рис. 2a). Относительная эффективность определялась как отношение одновременных отсчетов совпадений сигналов двух каналов нейтронного детектора (C_1 и C_2) и сигнала сцинтилляционного счетчика C_3 к счету сигналов сцинтилляционного счетчика $\varepsilon = (N_{123}/N_3) \cdot 100\%$, где N_{123} — счет совпадений сигналов двух каналов нейтронного детектора и сигнала сцинтилляционного счетчика; N_3 — счет сигналов сцинтилляционного счетчика.

Эффективность регистрации нейтронным детектором є космических мюонов определялась по схеме "напролет", в которой нейтронный детектор располагался на одной оси между двумя триггерными сцинтилляционными счетчиками C_3 и C_4 (рис. 2б). Размеры сцинтилляционных счетчиков составляли $10 \times 10 \times 5$ мм. Относительная эффективность в этом случае определялась как отношение счета совпадений сигналов с двух каналов нейтронного детектора к счету совпадений сигналов двух триггерных счетчиков: $\varepsilon = (N_{1234}/N_{34}) \cdot 100\%$, где N_{1234} – счет совпадений сигналов двух каналов нейтронного детектора (C_1 и C_2) и сигналов двух триггерных счетчиков (C_3 и C_4); N_{34} – счет совпадений сигналов двух триггерных счетчиков.

Перед исследованием относительной эффективности є было определено среднее энерговыделение космических мюонов в нейтронном детекторе. При этом измерении тонкий сцинтилляционный счетчик с радиоактивным источником ⁶⁰Со располагался в центре одного из полуколец при $\phi = 0$ в точке с координатой x = 25 мм положения триггерного сцинтилляционного счетчика



Рис. 2. Схема калибровки прототипа кольцевого нейтронного детектора с использованием радиоактивного источника ионизирующего излучения ⁶⁰Со (**a**) и космических мюонов (**б**). C_1 и C_2 – счетчики левого нейтронного детектора; C_3 и C_4 – триггерные сцинтилляционные счетчики; Pb – свинцовый коллиматор.

в промежутке между внутренним и внешнем радиусами нейтронного детектора (рис. 1). Сигналы снимались с обоих каналов полукольца нейтронного детектора, и определялось среднее значение амплитуды. Аналогично амплитуда сигнала с нейтронного детектора определялась и в случае регистрации космических мюонов с помощью схемы "напролет" двумя триггерными счетчиками при тех же значениях ф и х. Было определено, что отношение средних амплитуд составило $\langle A_{\rm KM} \rangle / \langle A_{\rm HCT} \rangle \sim 10$, где $\langle A_{_{\rm KM}} \rangle$ и $\langle A_{_{\rm ИСT}} \rangle$ – среднее значение амплитуд в энергетических спектрах космических мюонов и источника ⁶⁰Со соответственно. Таким образом, можно было считать, что среднее энерговыделение космических мюонов при их прохождении через толщину в 50 мм нейтронного детектора составляет ~13 МэВ.

Дальнейшие измерения показали, что относительная эффективность ε кольцевого нейтронного детектора ведет себя сложным образом в зависимости от угла ϕ и расстояния *x*.

На рис. З представлено изменение є при изменении x (на симметрии полукольца при $\varphi = 0$), где в качестве источника использовался радиоактивный источник ⁶⁰Со. Видно, что для энергий частиц радиоактивного источника величина є невелика и в зависимости от x не является постоянной величиной. Зависимость є имеет максимум и плавно спадает к краям. Зависимость несимметрична относительно центра полукольца (x = 25 мм) и сдвинута к внешнему радиусу на ≈4 мм как в случае



Рис. 3. Зависимость относительной эффективности є регистрации нейтронного детектора от места попадания частицы в детектор при $\phi = 0$ (источник ⁶⁰Co): *1* – совпадение двух каналов полукольца нейтронного детектора и тонкого сцинтилляционного счетчика (*C1* · *C2* · *C3*); *2* и *3* – совпадение первого (*C1* · *C3*) и второго (*C2* · *C3*) каналов нейтронного детектора с тонким сцинтилляционным счетчиком соответственно.

совпадений сигналов C1 и C2 с двух каналов нейтронного детектора C_1 и C_2 и сигнала C3 со счетчика C_3 ($C1 \cdot C2 \cdot C3$), так и парных совпадений сигналов каналов ($C1 \cdot C3$ и $C2 \cdot C3$). Значительная разница в величинах ε при парных совпадениях сигналов каналов $C1 \cdot C3$ и $C2 \cdot C3$ объясняется меньшей чувствительностью фотокатода ф.э.у. счетчика C_1 по сравнению с чувствительностью C_2 при указанных значениях напряжения на делителях ф.э.у.

На рис. 4 представлено изменение є в зависимости от угла φ при радиусе $x = x_{\rm T} = 27.5$ мм (рис. 1). Видно, что є имеет максимум в центре полукольца є = $\varepsilon_{\rm max}$ при $\varphi = 0$. Форма кривой совпадений каналов нейтронного детектора и сцинтилляционного счетчика ($C1 \cdot C2 \cdot C3$) совпадает с формой кривой при парном совпадении одного из каналов со сцинтилляционным счетчиком ($C1 \cdot C3$ и $C2 \cdot C3$) так же, как представлено на рис. 3.

Исследование зависимости ε от *x* для других углов ϕ показало, что форма зависимости ε , подобная той, что представлена на рис. 3, является типичной.

Однако рис. 4 показывает, что существуют углы, при которых ε имеет максимум и минимум (углы φ от 0 до -85° в сторону счетчика C_1). На огибающей кривой зависимости ε от φ существуют пики с увеличенной интенсивностью. Пики при углах φ от 0 до $+85^{\circ}$ в сторону счетчика C_2 практически отсутствуют.

Было также обнаружено, что для каждого угла φ существует точка $x = x_{max}$, в которой ε имеет



Рис. 4. Зависимость относительной эффективности є регистрации нейтронного детектора от угла φ (источник ⁶⁰Co): *1* – совпадение двух каналов полукольца нейтронного детектора и тонкого сцинтилляционного счетчика (*C1* · *C2* · *C3*); *2* и *3* – совпадение первого (*C1* · *C3*) и второго (*C2* · *C3*) каналов нейтронного детектора с тонким сцинтилляционным счетчиком соответственно.

максимальную величину $\varepsilon = \varepsilon_{max}$. На рис. 5 представлена зависимость ε_{max} от угла φ . Видно, что зависимость симметрична относительно центра полукольца с двумя максимумами при $\varphi_{max} \sim \pm 45^{\circ}$ ($x_{max} \approx 35$ мм и $x_{max} \approx 32$ мм). Точка $x = x_{max}$ смещена от осевой линии, определенной координатой x = 25 мм, на 15 и 12 мм соответственно.

Сложная форма зависимостей є на рис. 3–5 может означать, что детектор такой геометрической формы (с одной стороны отражающая по-



Рис. 5. Зависимость координаты $x = x_{max}$, при которой $\varepsilon = \varepsilon_{max}$, от угла ϕ .



Рис. 6. Зависимость относительной эффективности є регистрации нейтронного детектора от угла φ (космические мюоны): 1 – совпадение сигналов двух каналов полукольца нейтронного детектора и сигналов двух триггерных сцинтилляционных счетчиков ($C1 \cdot C2 \cdot C3 \cdot C4$); 2 и 3 – суммирование с помощью схемы ИЛИ сигналов первого (C1 + C3 + C4) и второго (C2 + C3 + C4) каналов нейтронного детектора с сигналами триггерных сцинтилляционных счетчиков соответственно.

верхность — рефлектор (при x = 50 мм), с другой стороны отражающая поверхность — рефрактор (при x = 0)) обладает внутренней фокусирующей способностью для лучей с углом полного внутреннего отражения, которая может приводить к образованию "мертвых" зон с уменьшенной величиной ε , и их можно "сглаживать" неточностью разрезания сцинтилляционного кольца по оси симметрии при формировании двух полуколец (рис. 1). Разные значения x_{max} при ϕ_{max} (рис. 5), возможно, и связаны с непараллельностью торцевой плоскости, на которых находятся ф.э.у. счетчика C_2 .

Поведение є нейтронного детектора при его калибровке космическими мюонами от угла φ в точке x = 27.5 мм представлено на рис. 6. Видно, что форма кривой в целом совпадает с формой рис. 4. Однако численные значения є существенно выше для всех углов φ и в максимуме при $\varphi = 0$ величина є составляет ~96%.

Однако при данной конструкции нейтронного детектора существует значительное поглощение света при нескольких отражениях от поверхностей полукольца при его прохождении от трека прошедшей частицы до ф.э.у. любого счетчика, особенно если частица прошла вблизи одного из ф.э.у. Это хорошо видно при значительных углах φ (кривая *1*) и использовании схемы совпадений типа *И* для совпадения сигналов с двух каналов полукольца нейтронного детектора и сигналов с двух триггерных счетчиков (*C*1 · *C*2) · (*C*3 · *C*4). Если использовать схему *ИЛИ*, то величины значений є на торцах нейтронного детектора достигают значений 80–90% (кривые *2*, *3*).

Надо отметить, что фитирование экспериментальных точек, представленных на рис. 3–6, было выполнено с помощью программы РО.

В водородосодержащем сцинтилляторе регистрация нейтрона *n* осуществляется по протону отдачи *p*, т.е. по результату реакции *n*-*p*-взаимодействия, в которой энергия протона (E_p) определяется как $E_p = E_n \cos^2\Theta$, где $E_n -$ энергия нейтрона, Θ – угол рассеяния нейтрона. Световыход $L(E_p)$ сцинтиллятора при взаимодействии с ним протона можно выразить через эквивалентную по величине световыхода энергию электрона (E_p) [4, 5]. С точностью до 5% имеем для $E_p = 0-6$ МэВ энергию электрона $E_e = 0.16E_p^{1.5}$ и для $E_p = 6-17$ МэВ – $E_e = 0.23E_p^{1.3}$.

Таким образом, оценка энергии протона при $\Theta = 0$ составляет $E_p \approx 4$ МэВ при средней энергии комптон-электронов источника ⁶⁰Со и $E_p \approx 22$ МэВ при средней энергии космических мюонов, полученной при калибровке (~13 МэВ). Таким образом, детектор может регистрировать нейтроны, как минимум, с энергией $E_n \ge 4$ МэВ.

Тем не менее, ввиду сложной зависимости ε от энергии нейтрона, необходима прямая калибровка кольцевого нейтронного детектора на пучках нейтронов при $E_n \le 4$ МэВ и $E_n \ge 4$ МэВ [6].

Авторы благодарят А.В. Верди, Л.А. Горбова, В.В. Ким за помощь в работе.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы "Фундаментальные исследования" Президиума Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Говорков Б.Б. Препринт ФИАН № 87. М., 1988.
- Baskov V.A., Shroder B., Govorkov B.B., Lebedev A.I., Poliansky V.V. Preprint of P.N. Lebedev Phisycal Institute of the Russian Academy of Sciences № 5. M., 2007.
- 3. Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Карпов В.А. Препринт ФИАН № 87. М., 1991.
- Pieroni N., Rusch D. // Nucl. Instrum. and Methods. 1974. V. 115. P. 317.
- 5. Джелепов В.П. Препринт ОИЯИ № 13-87-476. Дубна, 1987.
- 6. Шафранов М.Л. // ЭЧАЯ. 1975. Т. 6. Вып. 3. С. 776.