

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический
ИНСТИТУТ



имени
П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

22

С.В. АФАНАСЬЕВ, В.А. БАСКОВ, А.И. ЛЬВОВ,
А.В. КОЛЬЦОВ, Л.Н. ПАВЛЮЧЕНКО,
В.В. ПОЛЯНСКИЙ, Е.В. РЖАНОВ, С.С. СИДОРИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА НЕЙТРОННОГО
ДЕТЕКТОРА НА КОСМИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ**

Москва 2014

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА НА КОСМИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

С.В. Афанасьев¹, В.А. Басков, А.И. Львов, А.В. Кольцов, Л.Н. Павлюченко, В.В. Полянский*, Е.В. Ржанов, С.С. Сидорин

А Н Н О Т А Ц И Я

Представлены результаты исследования на космическом излучении временных характеристик прототипа нейтронного детектора, предназначенного для измерения времени пролёта и определения координаты точки взаимодействия высокоэнергетичного нейтрона в детекторе. Рассмотрены различные конфигурации и временные характеристики мониторной сцинтилляционной триггерной системы. Временные разрешения прототипа нейтронного детектора и мониторной системы составили $\sigma \approx 0,7$ нс и $\sigma \approx 0,2$ нс, соответственно.

STUDY OF THE NEUTRON DETECTOR PROTOTYPE ON THE COSMIC RADIATION

S.V. Afanas'ev¹, V.A. Baskov, A.I. L'vov, A.V. Koltsov, L.N. Pavlyuchenko, V.V. Polyanskiy*, E.V. Rzhanov, S.S. Sidorin

A B S T R A C T

The results of research on cosmic radiation, the time characteristics of the neutron detector prototype for the measuring time of flight and determine the coordinates of the interaction point for high-energy neutron in the detector are presented. Various configurations and the time characteristics of the monitor scintillation trigger system are studied. The time resolution prototype neutron detector and monitor system amounted $\sigma \approx 0,7$ ns and $\sigma \approx 0,2$ ns respectively.

* - poly@pluton.lpi.troitsk.ru

¹ – Объединенный институт ядерных исследований, Дубна (JINR, Dubna)

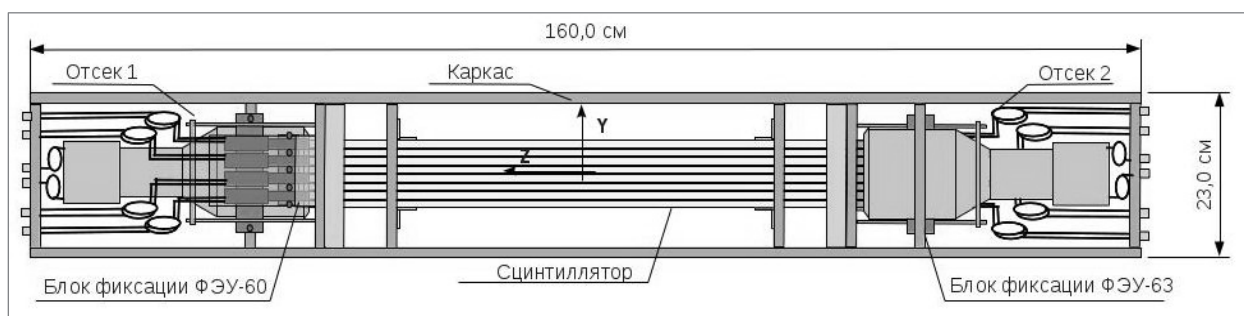
Предварительные результаты исследований двухнуклонной моды распада эта-мезонного ядра $\eta NN \rightarrow NN$, возникающего в результате поглощения эта-мезона ядром, дают указания на существование коррелированной (pn)-пары, связанной с этим процессом. На ускорителе НУКЛОТРОН ОИЯИ (Дубна) предполагается проведение эксперимента на установке с внутренней мишенью использующей методику времени-пролета в качестве основной для исследования различных мод распада эта-ядра и, в частности, моды распада на (pn)-пары [1]. Для регистрации нейтрона пары предполагается создать нейтронный детектор с хорошим временным разрешением, с целью наилучшего восстановления энергии нейтрона и, как следствие – энергии нуклонной пары. Наличие пика в подпороговой области спектра полных энергий пары свидетельствует о захвате (связанном состоянии) эта-мезона ядром.

В данной работе представлены результаты исследования временных характеристик на космическом излучении первого варианта прототипа нейтронного детектора (ПНД) и системы мониторинга на основе сцинтилляционных и черенковских счетчиков.

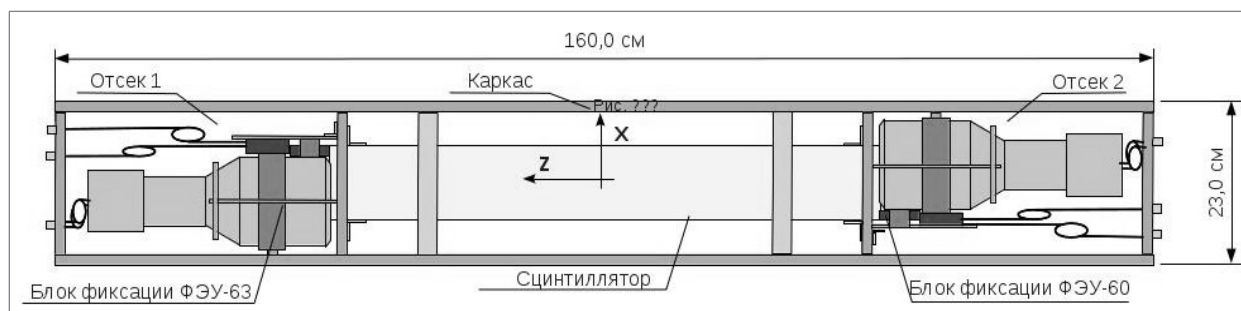
Схема ПНД представлена на рис 1. Прототип состоит из трех основных частей: корпуса, сцинтилляционной системы и оптико-электронной системы съёма оптических сигналов.

Корпус включает в себя каркас, на котором крепятся сцинтилляционная система и система съёма оптических сигналов. Для исключения попадания света в детектор каркас снаружи закрыт светозащитными панелями из 1 мм текстолита.

Сцинтилляционная система представляет собой стопку из 8 полированных со всех сторон пластин стандартного пластикового сцинтиллятора (NE110) (полистирол + 1,5% p-terphenyl + 0,01% POPOP [2]) размером $800 \times 100 \times 10 \text{ мм}^3$ изготовленных в ОИЯИ (рис. 2). Каждая сцинтилляционная пластина была светоизолирована (обёрнута) чёрной бумагой за исключением торцов, контактирующих с фотокатодами ФЭУ.



а.



б.

Рис. 1 Схема прототипа нейтронного детектора со снятыми боковыми светозащитными панелями: а – вид в плоскости $Y-Z$; б – вид в плоскости $X-Z$.

В соответствии с предназначением ПНД, система съёма оптических сигналов разбита на две подсистемы: систему считывания интегральных сигналов с помощью ФЭУ-63 (2 канала) и системы считывания оптических сигналов от отдельных пластин, с распределенных в шахматном порядке ФЭУ-60 (по 4-ре с каждой торцевой стороны сцинтилляционной пластины - всего 8 каналов, рис. 1). Центры фотокатодов ФЭУ-63 сдвинуты относительно оси стопки сцинтилляторов, совпадающей с осью Y на рис. 1, на 4 см относительно друг друга для того, чтобы была возможность разместить ФЭУ-60 в углу каждой сцинтилляционной пластины. Фотокатоды всех фотоэлектронных умножителей (как ФЭУ-63, так и ФЭУ-60) плотно, без смазки, прижаты к торцам сцинтилляционных пластин. Разъёмы кабелей питания и сигналов выведены на внешнюю поверхность каркаса.

Так как в исследованиях применялась времяпролетная методика, то оказался важным учёт длины затухания в сцинтилляционных пластинах, поскольку величина затухания влияет на время прохождения сигнала от точки

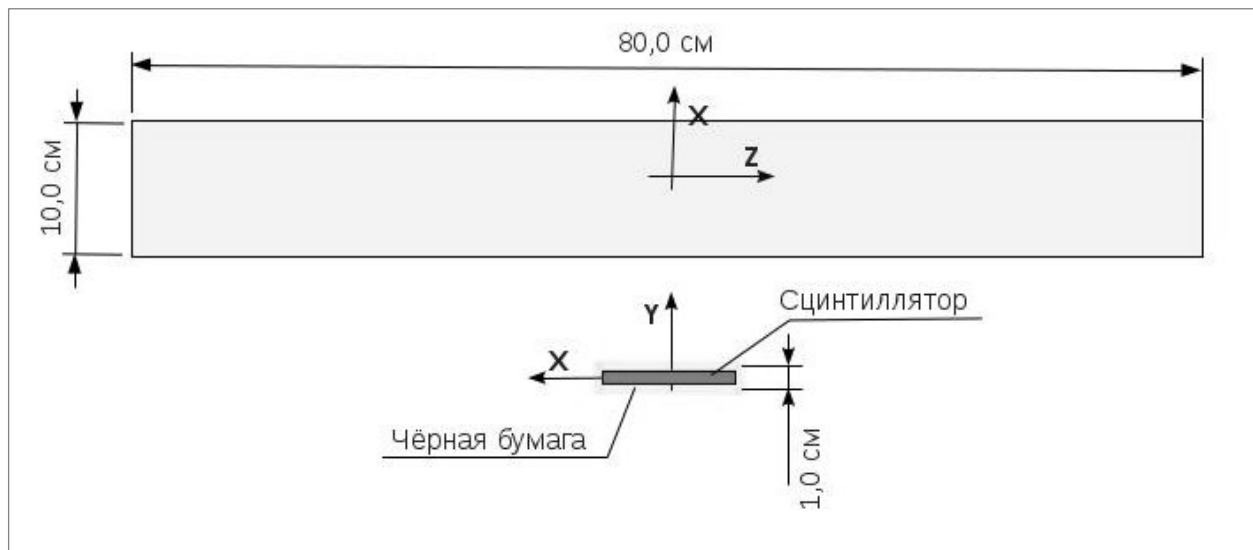


Рис. 2 Вид и размеры сцинтилляционной пластины ПНД.

взаимодействия частицы в сцинтилляторе до фотокатода ФЭУ и величину временного разрешения. Для макета были отобраны сцинтилляционные пластины с близкой длиной затухания (рис. 3).

Исследование временных характеристик ПНД было выполнено на космическом излучении. Предварительно была проведена работа по определению конфигурации триггера, числа и формы триггерных сцинтилляционных счетчиков. Основным требованием к триггеру было наличие лучшего временного разрешения по отношению к временному разрешению ПНД $\Delta t_{\text{триггер}} < \Delta t_{\text{ПНД}}$. Из предварительного моделирования работы ПНД следовало, что временное разрешение триггера должно составлять величину порядка $\Delta t_{\text{триггер}} \sim 0,2$ нс.

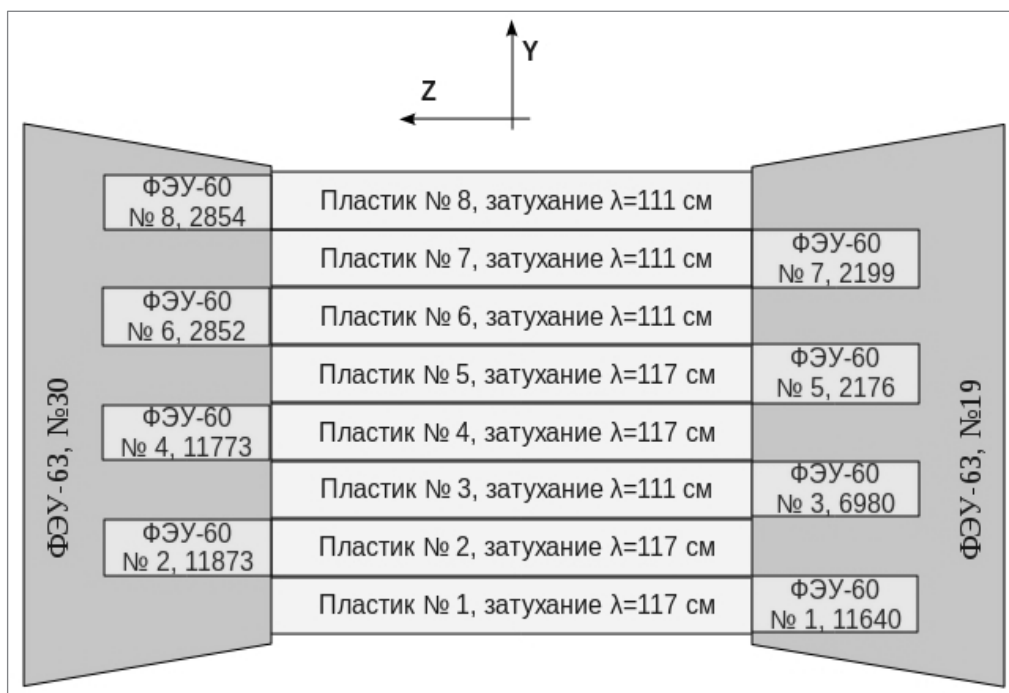


Рис. 3 Длины затухания сцинтилляционных пластин, нумерация пластин и ФЭУ и их расположение в системах считывания ПНД.

Для исследования характеристик ПНД была выбрана типичная схема организации триггерной системы, представляющая собой исследуемый ПНД, один стартовый и один мониторный счетчики, расположенные соответственно “сверху” и “снизу” относительно исследуемого. Один из вариантов схемы установки представлен на рис. 4.

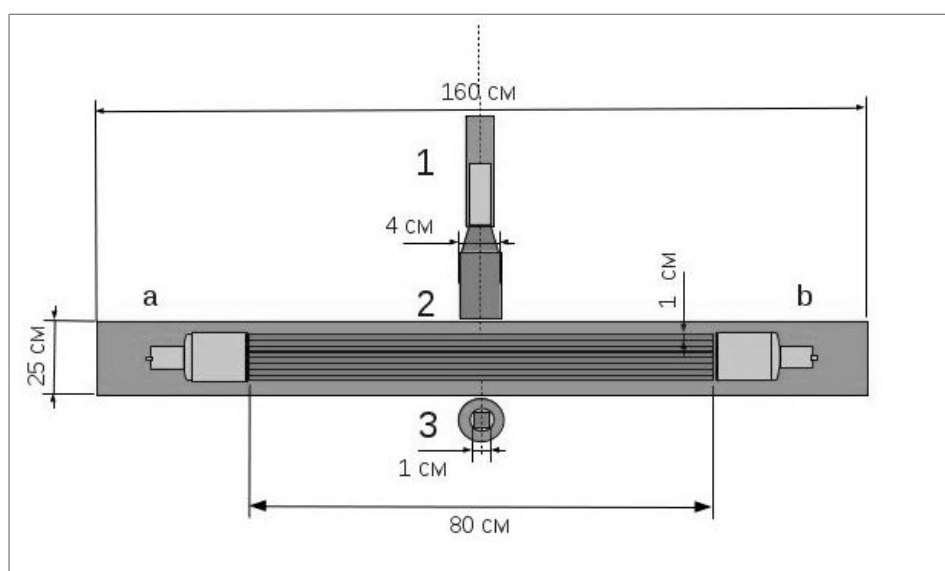


Рис. 4 Схема расположения триггерного и мониторного счетчиков относительно ПНД при исследовании характеристик его на космическом излучении (1 – стартовый счетчик, 2 – ПНД, 3 – мониторный счетчик).

На космическом излучении были исследованы различные конфигурации стартового и мониторингового счетчиков (рис. 5).

На рисунке представлены следующие варианты счетчиков:

А – счетчик на основе стандартного пластикового сцинтиллятора (NE110) и ФЭУ-87 с делителем, специально подобранный под методику временных измерений.

В – счетчик на основе черенковского радиатора из свинцового стекла ТФ-1 размерами $5 \times 5 \times 2 \text{ см}^3$, просматриваемый ФЭУ-85.

С – счетчик, состоящий из 2-х ФЭУ-85 в оптическом контакте со световодом из оргстекла и сцинтиллятором цилиндрической формы радиусом 0,5 см и высотой 1 см в центре световода.

Д – счетчик на основе 2-х ФЭУ-85 в оптическом контакте со сцинтиллятором в виде кубика со стороной 1 см ($1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$).

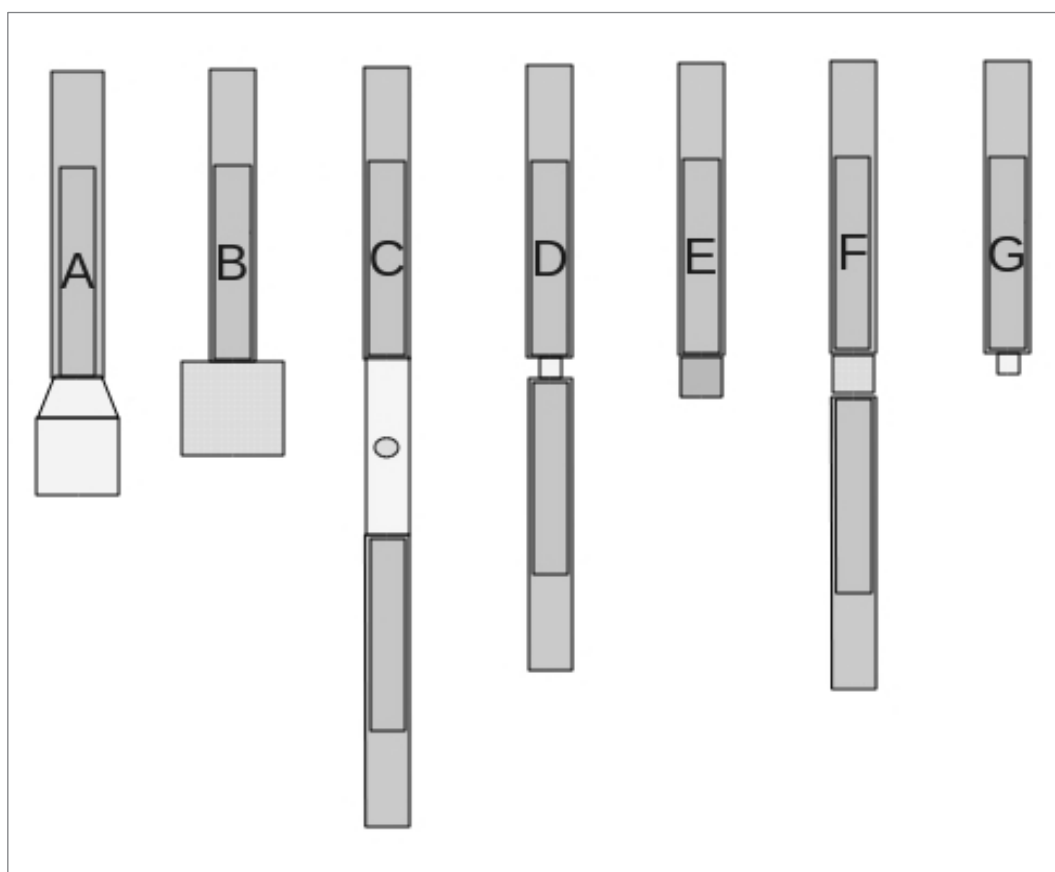


Рис. 5 Схема вариантов стартового и мониторингового счетчиков.

Е – счетчик на основе ФЭУ-85 в оптическом контакте со сцинтиллятором размером $2 \times 2 \times 2$ см³.

Г – счетчик на основе 2-х ФЭУ-85 в оптическом контакте с черенковским радиатором из оргстекла в виде кубика со стороной 2 см.

Г – счетчик на основе ФЭУ-85 в оптическом контакте со сцинтиллятором в виде кубика со стороной 1 см.

Варианты конфигураций и расположение счетчиков для определения временных характеристик триггерной системы, включающего стартовый и мониторный счетчики, представлены на рис. 6а, 7а, 8а. Временные характеристики заданной конфигурации триггерной системы определялись по ширине на половине высоты временного спектра мониторного счетчика с1. Данные по спектрам для соответствующей конфигурации представлены на рис. 6б, 7б, 8б (справа от варианта конфигурации счетчиков). Цена канала временной шкалы, представленной на оси абсцисс на всех гистограммах указанных рисунков, составила 0,4 нс; по оси ординат отложено число событий в относительных единицах.

Гистограммы на рис. 6-8 показывают преимущество конфигурации счётчиков D-A, рассматриваемых в качестве стартового и мониторного.

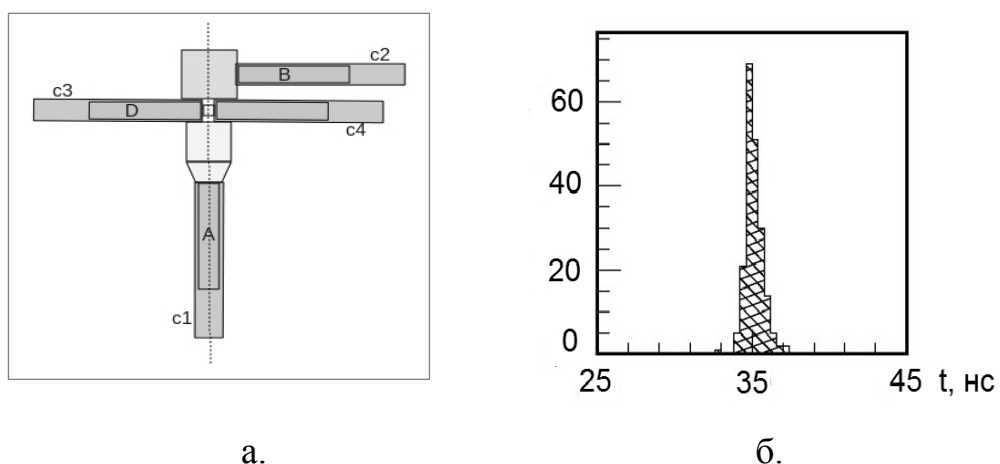
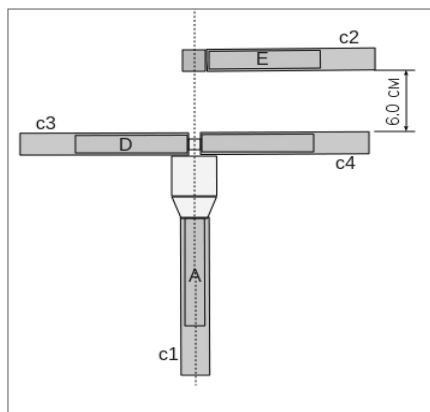
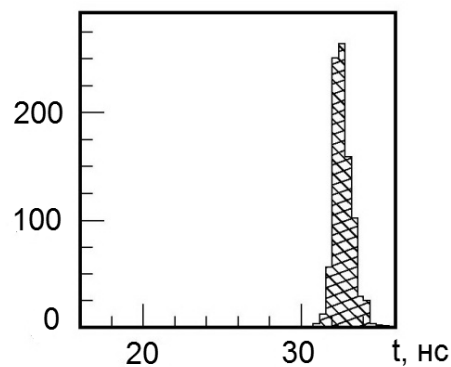


Рис. 6 Конфигурация счетчиков типа В, D, А (а) и временная гистограмма (б) на космическом излучении.

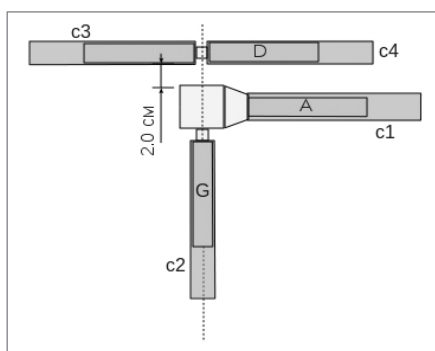


а.

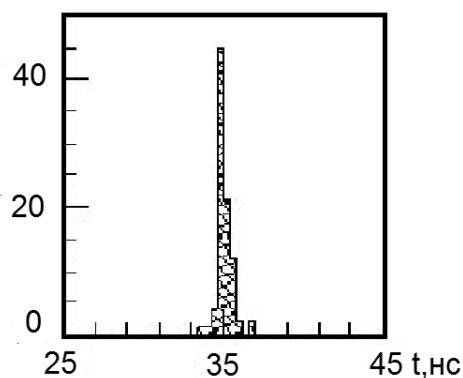


б.

Рис. 7 Конфигурация счетчиков типа D, E, A (а) и временная гистограмма (б).



а.



б.

Рис. 8 Конфигурация счетчиков типа A, D, G (а) и временная гистограмма (б).

Структурная схема электроники, обеспечивающая работу установки по изучению временных характеристик прототипа нейтронного детектора, приведена на рис. 9. Логика работы электроники, в общих чертах, выглядит следующим образом.

Импульс запуска вырабатывает ФЭУ стартового счетчика 1. На разветвителе аналоговых сигналов (канал Р-0) сигнал делится в соотношении 1:1, при этом одна часть отводится на формирователь со следящим порогом (ФСП, канал 0) а другая через линию задержки $L_{ЗЦП-0}$ поступает на вход зарядоцифрового преобразователя (ЗЦП) с субадресом А0.

Три логических сигнала с выходов ФСП (канал 0) используются в качестве -

- сигнала СТАРТ время-цифрового преобразователя (ВЦП) (без дополнительной задержки),
- входного сигнала на обычный формирователь (дискриминатор) для надёжного разветвления логического сигнала с минимальным временным разбросом (джиттер) и
- задержанного на линии Лвцп-0 логического сигнала СТОП ВЦП (канал 0).

Два выходных логических сигнала с дискриминатора (канал 8 на рис. 6) запускают генераторы сигналов ВОРОТА для блоков РЕГИСТР и ЗЦП.

Аналогично, только без фрагмента, обеспечивающего запуск генераторов сигналов ВОРОТА, построена работа и остальных времени-чувствительных каналов установки. К ним относятся два ФЭУ-63 прототипа нейтронного детектора и ФЭУ мониторного счётчика – каналы Р-1, Р-2 и Р-3, соответственно.

Запускающими импульсами индикаторных каналов являются сигналы с ФЭУ-60-х, которые поступают на входы блока дискриминаторов Дискрим- i (формирователи с фиксированным порогом). Далее, логические сигналы через линии задержки $L_{рег-i}$ подаются на соответствующий вход блока РЕГИСТР.

Считывание всех данных КАМАК-системы в компьютер происходит по наличию сигнала LAM на блоке ВЦП, время преобразования которого является наибольшим среди всех используемых блоков.

После исследования вариантов работы триггерной системы на космическом излучении была выбрана конфигурация счетчиков А-D, для которой, в предположении одинаковых свойств каналов с3(старт), с4 – $\sigma_s = \Delta N_{c4}/(2.35 \cdot \sqrt{2}) \approx 0,24$ нс (ΔN – полная ширина на половине высоты пика; цена канала гистограммы 0,2 нс). Кроме того, наилучшее временное разрешение для с1 составило: $\sigma^2 = (\Delta N_{c1}/2.35)^2 - \sigma_s^2 \approx 0,058$ нс², т.е. $\sigma \approx 0,24$ нс (рис. 10).

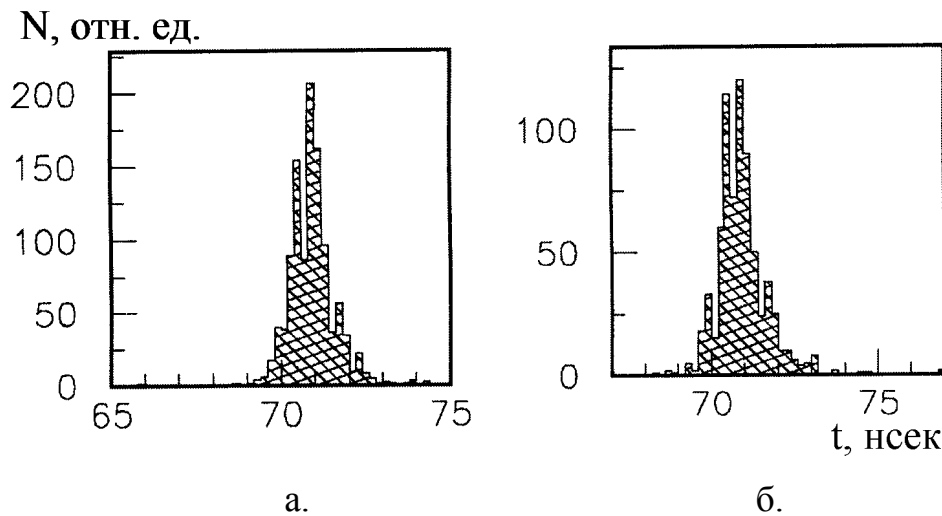


Рис. 10 Временные спектры прохождения космических частиц через счетчики триггерной системы, представленной на рис. 8а и 9; а – счетчик с4, б - счетчик с1.

После выбора триггерной системы были выбраны рабочие напряжения на обоих ФЭУ-63. Для этого счетчики триггера были выставлены по центру ПНД в конфигурации, показанной на рис. 4. В дальнейшем для каждого напряжения на ФЭУ-63 были получены временные спектры прихода сигналов на ФЭУ, по которым впоследствии по минимальному временному разрешению были определены рабочие напряжения на ФЭУ. В таблице 1 представлены напряжения на ФЭУ и разрешение временного спектра, определяемого как полная ширина спектра на половине его высоты ΔN (FWHM) в каналах ВЦП. Было определено, что рабочие напряжения для ФЭУ-63 (а) и ФЭУ-63 (б) составляют $U_a = 2000$ В и $U_b = 2300$ В, соответственно.

На космическом излучении были определены средние времена прихода сигналов и разрешения в зависимости от точки прохождения частицы через ПНД.

Таблица 1. Зависимость ширины распределения ΔN (FWHM, в каналах ВЦП) от величины высокого напряжения на ФЭУ (предварительные данные).

U _{ФЭУ,В}	1900	1950	2000	2050	2100	2200	2300	2400	2500
Число каналов ВЦП ΔN (FWHM)									
ФЭУ-63(а)	28	24	22	30	35	50	-	-	-
ФЭУ-63(б)	-	-	100	53	50	35	32	35	45

На рис. 11 представлены временные спектры прохождения космических частиц через ПНД для трёх позиций триггерной системы, полученные с ФЭУ-63 (канал а, рис. 4): расстояние от ФЭУ составило 12, 40 и 70 см, соответственно. Видно, что с увеличением расстояния увеличивается время прихода сигнала и ухудшается разрешение. Наилучшее разрешение ПНД, с учётом разрешения стартового канала (с4) и триггера $T = c1 \times c3$ (конфигурация триггера являлась совпадением счетчиков с1 и с3 (рис. 8а)), составило $\sigma^2 = (\Delta N_a / 2.35)^2 - \sigma_s^2 = 0,58 - 0,058 \approx 0,5 \text{ нс}^2$, т.е. $\sigma \approx 0,7 \text{ нс}$.

Была исследована работа фотоумножителей ФЭУ-60, регистрирующих сигналы с отдельных пластин сцинтиляционной сборки, в зависимости от точки прохождения частицы через сборку (относительно расположения фотоумножителей ФЭУ-63) (рис.12). Целью регистрации сигнала с отдельной пластины является определение точки взаимодействия нейтрона в глубине сборки. Из рис. 12 ($T = c1 \times c3$) видно, что при прохождении частицы вблизи ФЭУ-63 в основном срабатывают каналы 1, 3, 5, 7 (рис. 12а) или 2, 4, 6, 8 (рис. 12в), в зависимости от прохождения частицы вблизи торца “а” или “б”, соответственно (рис. 4). При прохождении частиц по центру сцинтиляционной сборки

срабатывают все 8 каналов (рис. 12б). Однако при усилении триггера

N , отн. ед.

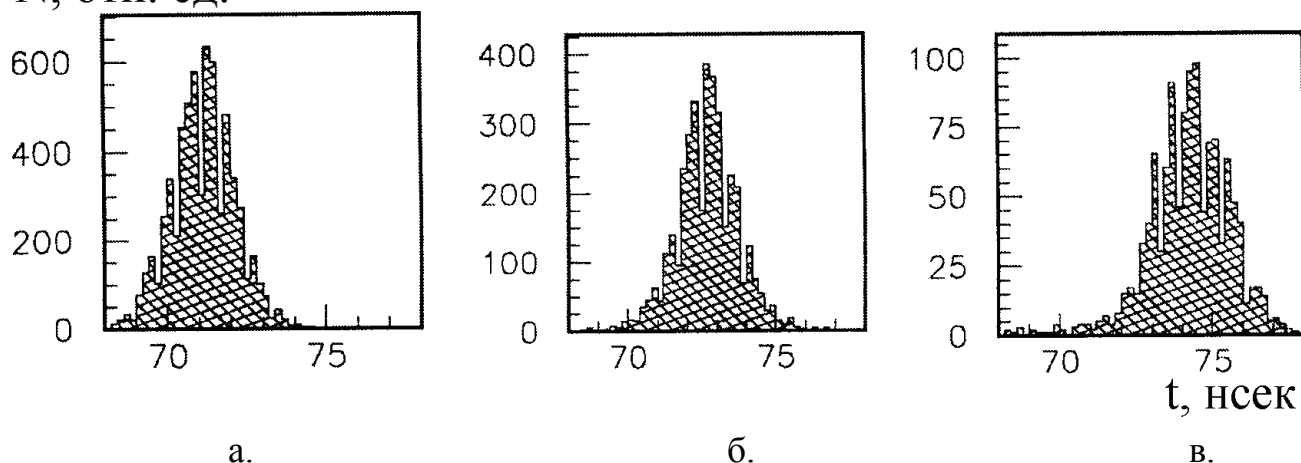
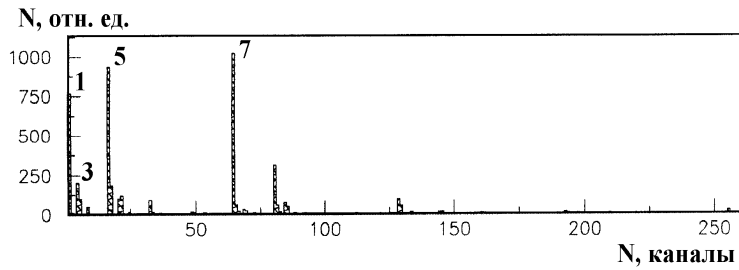


Рис. 11 Временные спектры прохождения космических частиц через ПНД (расстояние от ФЭУ с индексом “а” (рис. 4 и 9): а – 12 см, б -41 см, в – 70 см).

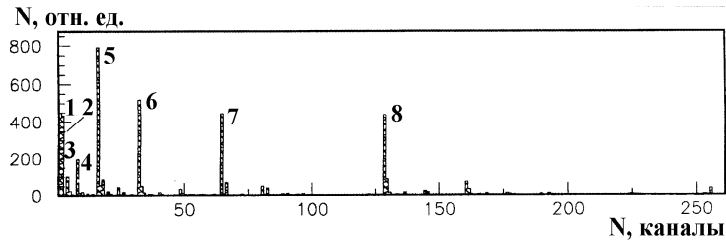
$T = (c1 \times c3)(a \times b)$, который является добавлением к совпадению триггерных счетчиков совпадений каналов сцинтиляционной сборки а и б, срабатывают также все 8 каналов сборки (частица проходит сборку вблизи канала “б”) (рис.12г). Это связано с тем, что усиление триггера ведет к регистрации событий с высоким энерговыделением в сцинтиляционной сборке, которая в свою очередь является суммой энерговыделений в каждой пластине. Усиление триггера ведет к уменьшению эффективности регистрации, но даёт возможность регистрировать события с помощью ФЭУ-60 с каждой пластины сборки (рис. 12г).

В результате исследований мониторинговой системы были сделаны замечания о возможностях использования всей системы и отдельных её элементов:

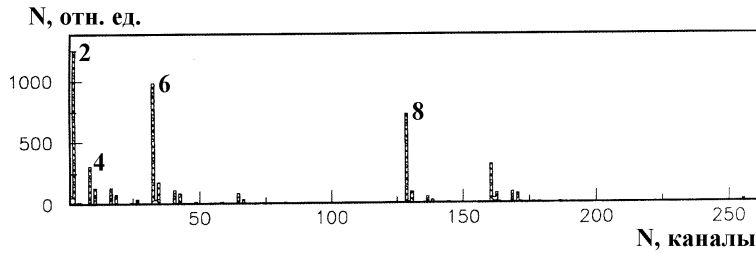
ФЭУ-87 предпочтительно использовать во временных измерениях, чем ФЭУ-85 в основном из-за специальной формы поверхности (сферической, а не плоской как у стандартных ФЭУ-85) фотокатода, конструкции диодной системы, которая, кроме прочего, позволяет подавать более высокое напряжение питания (более 2000 В);



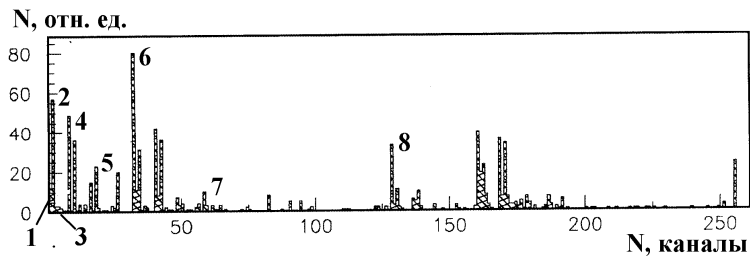
а.



б.



в.



г.

Рис. 12 Гистограммы срабатывания каналов по глубине сборки в зависимости от точки прохождения частицы и типа триггера (а, б, в – точки прохождения частиц в 12, 41 и 70 см от ФЭУ-63 канала а (триггер $T = c1 \times c3$); г – точка прохождения частиц в 70 см от ФЭУ-63 канала а (триггер $T = (c1 \times c3)(a \times b)$); номера каналов по глубине относительно точки вхождения частицы в сборку представлены на гистограммах справа от спектров).

Неудовлетворительные результаты по временному разрешению при использовании черенковских радиаторов малых размеров вместо

сцинтилляторов для стартовых счётчиков, несмотря на очевидное преимущество – короткую, 1 – 2 нс вспышку, связаны, по-видимому, с малым количеством излучаемого света в радиаторе, а также с неудовлетворительным светособиранием вследствие характера углового распределения черенковского света;

Применение стандартного пластического сцинтиллятора из ОИЯИ (NE110 [2], с длиной поглощения света 110-120 см) для детекторов малых размеров по сравнению с более прозрачным пластическим сцинтиллятором (выпуска конца 80-х годов, Харьков) даёт лучший результат, по-видимому, благодаря большему световыходу;

Применение сцинтиллятора небольшого объёма ($\sim 1 \text{ см}^3$, конфигурация **D**, рис. 5 и 8а) с двумя ФЭУ-85, расположенными в горизонтальной плоскости и находящимися в оптическом контакте с противоположными гранями сцинтиллятора, позволяет получить с ФЭУ-85 временное разрешение менее $\sigma \sim 0,2 \text{ нс}$;

Применение дискриминаторов с фиксированным порогом в качестве формирователей логических импульсов является оправданным при использовании черенковских радиаторов. В случае сцинтилляционных блоков и отсутствия в схеме данного канала измерителя заряда в импульсе (ЗЦП), применение ФСП даёт лучший результат.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: лучшая конфигурация триггерной части представляет собой систему в которой совпадают сигналы двух счётчиков, “просматривающих” сцинтиллятор типа NE110 небольшого объёма ($\sim 1 \text{ см}^3$) и при этом в качестве оптических детекторов используются ФЭУ-87. Использование данных с двух ФЭУ, просматривающих один блок сцинтиллятора, даёт возможность улучшить временную привязку стартового импульса, что, в свою очередь, позволяет достичь временного разрешения триггерной системы ПНД не хуже $\sigma \sim 0,2 \text{ нс}$. Наилучшее временное разрешение ФЭУ-63, полученное при исследовании характеристик ПНД на космическом

излучении, составило $\sigma \sim 0,7$ нс. Обнаружено, что слабый триггер, определяемый только двумя счетчиками триггерной системы, давал возможность контролировать прохождение частицы через сборку на расстоянии от ФЭУ вплоть до центра сборки. Усиление триггера путем введение в совпадение со счетчиками триггерной системы каналов ПНД дало возможность контролировать прохождение частицы по глубине детектора на всём расстоянии от одного торца сборки до другого.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.В. Афанасьев, В.А. Басков, А.В. Кольцов и др. // Ядерная физика и инжиниринг, 2014 (в печати).
3. С. В. Афанасьев, Л.Я. Жильцова, В.И. Колесников и др. // Краткие сообщения ОИЯИ, 1997, №1[81]-97, С. 45.

Подписано в печать 24.11.2014 г.
Формат 60x84/16. Заказ № 57. Тираж 140 экз. П.л 1,25.
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640