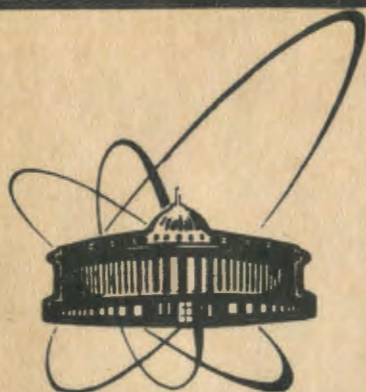


89-98



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

К 18

P15-89-98

В.В.Каманин, А.Кутлер, Ю.Г.Соболев,
А.С.Фомичев, С.Бацев¹, И.Давид², Ю.В.Зоренко³

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ
С ПОМОЩЬЮ ТЕХНИКИ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ФОСФИЧ-ДЕТЕКТОРА

¹ ИЯИАЭ БАН, София, НРБ

² ЦИФ, Бухарест, СРР

³ НИИ материалов, Львов

1989

ВВЕДЕНИЕ

В ЛЯР ОИЯИ разработаны проекты двух крупных многодетекторных установок — ФОБОС^{1/1} и ПЭГАС^{2/1}, предназначенных для регистрации различных продуктов ядерных реакций в 4π -геометрии в широком энергетическом диапазоне (от нескольких МэВ/нуклон до 120 МэВ/нуклон). Для регистрации легких заряженных частиц (p, d, t, ³He, ⁴He, ⁶Li, ⁷Li,...) нейтронов и γ -квантов в этих установках предполагается использование комбинированных сцинтилляционных $\Delta E-E$ -телескопов (так называемых "фосфич"-детекторов), способных устойчиво работать при нагрузках до 10^5 c^{-1} и дающих большую площадь обзора.

В работе подробно описаны принцип работы комбинированного "фосфич"-детектора и возможные схемы сбора информации, приведены экспериментальные результаты по α - γ -сепарации с помощью техники "фосфич"-детектора, даны краткие сведения о свойствах некоторых вариантов сцинтилляционных телескопов.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ

Еще в 1961 году было замечено, что для ряда неорганических сцинтилляторов CsI(Tl), CsI(Na), NaI(Tl), BaF₂ форма импульса свечения во времени существенно зависит от вида ионизирующего излучения^{3/1}. Затем аналогичное свойство было выявлено и у органических сцинтилляторов из стибьена, пластика NE102A и др. Однако это свойство долгое время оставалось труднореализуемым и не находило применения. С развитием ядерной электроники появилась возможность дискриминации сигналов по форме импульса, что позволило получить достаточно эффективную n - γ - и γ - p - α -сепарацию одним сцинтиллятором^{4/1}.

Оказалось, что всякий люминесцентный процесс во времени описывается функцией свечения $L(t)$, состоящей как минимум из двух компонент, быстрой и медленной:

$$L(t) = L_6 \cdot \exp(-t/\tau_6) + L_M \cdot \exp(-t/\tau_M).$$

Соотношение $R = L_6/L_M$, существенно зависящее от сорта частиц, отражает именно то свойство, которое позволяет получить информацию

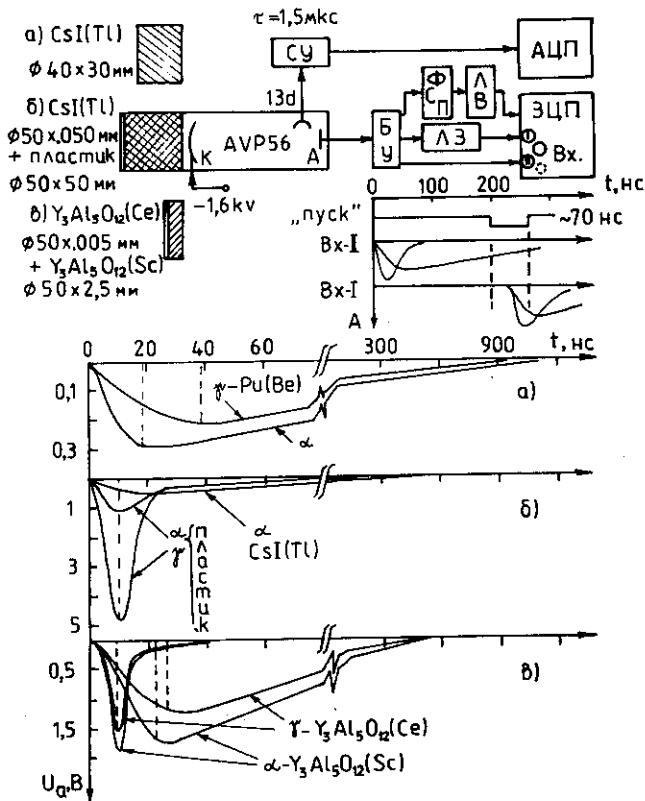
о сорте излучения при помощи одного сцинтиллятора, причем наиболее чувствительной к сорту частиц или γ -квантам может быть как быстрая составляющая L_6 (Cs(Tl), BaF₂ и др.) при $L_M \approx \text{Const}$, так и медленная L_M (стильбен) при $L_6 \approx \text{Const}$. Однако форма импульса свечения уже при $Z > 2$ становится практически постоянной, так как величина R достигает своего насыщения, и поэтому удовлетворительно идентифицировать частицы, более тяжелые, чем α -частица, таким способом невозможно.

Расширение диапазона регистрируемых частиц стало возможным с использованием комбинированных сцинтилляционных детекторов, так называемых "фосфичей", состоящих из двух или более сцинтилляторов, различающихся временами высвечивания в $10 \div 1000$ раз, оптически соединенных между собой и просматриваемых одним фотоэлектронным умножителем. Принцип работы такого комбинированного детектора аналогичен принципу работы классического полупроводникового ΔE -телескопа. Информация о сорте частиц получается по ионизационным потерям (dE/dx) в тонком пролетном сцинтилляционном слое, а остаточная энергия частиц ($E - \Delta E$) регистрируется толстым сцинтиллятором¹⁵. Отличие фосфича заключается в том, что вместо двух сигналов "ΔE" и "E-ΔE", как у полупроводникового телескопа, есть только один суммарный сигнал с ФЭУ, несущий информацию и о сорте частиц, и об их остаточной энергии. Поэтому к временным свойствам составных компонент фосфича кроме разницы времен высвечивания в $1 \div 3$ порядка предъявляется еще одно требование — преимущественной компонентой должна быть или быстрая, или медленная, то есть для одного сцинтиллятора $(L_6/L_M) \gg 1$, а для другого $(L_6/L_M) \ll 1$. Тогда для составных компонент фосфича обеспечивается минимальное перекрытие импульсов свечения по времени и упрощается анализ суммарного сигнала с ФЭУ. Например, фосфич, состоящий из пластика NE102 толщиной 0,2 мм ($\tau_6 = 2,4$ нс) и CsI(Tl) толщиной 50 мм ($\tau_6 = 0,4 + 0,7$ мкс, $\tau_M = 7$ мкс), позволяет удовлетворительно идентифицировать продукты ядерной реакции ^{40}Ar (30 МэВ/нуклон) на углеродно-дейтериевой мишени с зарядом до $Z \approx 19$ ¹⁶.

На рис. 1 приведены два варианта испытанных нами фосфич-детекторов CsI(Tl) $\phi 50 \times 0,05$ мм² + пластик $\phi 50 \times 50$ мм², $Y_3Al_5O_{12}$ (Ce) $\phi 50 \times 0,005$ мм² + $Y_3Al_5O_{12}$ (Sc) $\phi 50 \times 2,5$ мм² и вариант детектора на основе кристалла CsI(Tl) $\phi 40 \times 30$ мм², работающий в режиме фосфича. На рисунке также показаны временные сигналы с анода ФЭУ, возникающие при облучении сцинтилляторов источниками α -частиц из ^{227}Ac с $E_\alpha = 5,71; 6,62; 6,82; 7,38$ МэВ и γ -квантов от Pu(Be)-источника с $E_\gamma = 4,44$ МэВ.

Схема сбора информации, изображенная на рис. 1, была общей для трех случаев — а, б, в — и работала следующим образом.

Рис. 1. Схема сбора информации с помощью техники фосфич-детектора и временные сигналы с анода ФЭУ от источников α -излучения ^{227}Ac , $\text{Ru}(\text{Be})$ для трех типов детекторов.



Сигналы с анода ФЭУ после усиления и аналогового разветвления на три составляющие компоненты (блок БУ) поступали на два входа зарядово-цифрового преобразователя (ЗЦП) и производили запуск. Сигналы, задержанные линейной задержкой (ЛЗ) на 200 нс,

поступали на вход-1, а незадержанные сигналы — на вход-II. ЗЦП типа КА006 открывался на время, равное 70 нс, сформированное линейными воротами (ЛВ), запуск которых осуществлялся стартовыми сигналами от формирователя со следящим порогом (ФСП).

Информацию об энергии α -частиц и γ -квантов можно также получить, интегрируя сигналы с предпоследнего диода ФЭУ спектроскопическим усилителем (СУ) за время формирования $\tau = 1,5 \text{ мкс}$ и преобразуя их в цифровой код аналогоцифровым преобразователем (АЦП) типа ПА24К. Аналогичным образом можно получить и сорт частиц, интегрируя анодные сигналы с помощью СУ за время $\tau = 0,25 \text{ мкс}$. Качество сепарации при этом не хуже, чем при использовании ЗЦП, а электроника значительно проще. Однако указанные преимущества ощутимы лишь для одного детектора, для многодетекторных систем целесообразнее использовать ЗЦП типа КА010, позволяющие обслужить 5 модулей одновременно.

Схема сбора информации, общая для фосфич-детектора и одного отдельного сцинтиллятора при регистрации α -частиц и γ -квантов от

данных источников излучений (рис. 1), не всегда приемлема для фосфича — в случае разделения высокоэнергетических заряженных частиц схема значительно усложняется по двум основным причинам.

1. Для разделения быстрой и медленной составляющих в суммарном сигнале необходим специальный блок электроники — быстрый (токовый) ключ или линейный усилитель с большим динамическим диапазоном усиления, поскольку амплитуда быстрой составляющей суммарного сигнала превосходит амплитуду медленной составляющей в $100 \div 1000$ раз при регистрации частиц с энергией до 100 МэВ/нуклон. На рис. 16 разница амплитуд сигналов от данных источников α - γ -излучения составляет фактор 10, и поэтому можно обойтись упрощенной схемой электроники.

2. Необходим учет вкладов быстрой и медленной компонент каждого сцинтиллятора в отдельности в суммарный сигнал или в интегрируемые временные интервалы. Наиболее полную информацию о взаимных вкладах быстрой и медленной компонент люминесцентного процесса можно получить, передавая в память ЭВМ всю форму суммарного сигнала с последующей "of line" сортировкой. Для этого необходим специальный ЦАП, оцифровывающий аналоговый сигнал с тактовой частотой задающего генератора. Уменьшение вкладов для схемы на рис. 1 достижимо при увеличении задержки аналогового сигнала, однако линия задержки более чем на 200 нс дает заметное искажение анодного сигнала, что накладывает свое ограничение.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2, 3 приведены двумерные матрицы, полученные одинаковым способом для вариантов на рис. 1а и рис. 1б при α - γ -облучении от источников ^{227}Ac , $\text{Pu}(\text{Be})$. В первом случае информация о типе излучения получена по разнице времен нарастания сигналов от α -частиц и γ -квантов, свойственной сцинтиллятору $\text{CsI}(\text{Tl})$. Интегрирование за 70 нс задержанных анодных сигналов с ФЭУ на 200 нс соответствует оси ординат, а оси абсцисс — интегрирование незадержанных сигналов, определяющее энергии α -частиц и γ -квантов. В комбинированном детекторе $\text{CsI}(\text{Tl}) + \text{пластик}$, наоборот, задержанные сигналы несут информацию об энергии α - γ -излучения, поглощенного пластиком, и, следовательно, им соответствует ось абсцисс. Незадержанным сигналам с ФЭУ, амплитуда которых определяется в основном сцинтилляциями в тонком слое $\text{CsI}(\text{Tl})$, соответствует ось ординат или сорт ионизирующего излучения. Из рис. 3 видно, что кроме двух областей, соответствующих совпадениям импульсов свечения от γ -квантов в пластике и тонком слое $\text{CsI}(\text{Tl})$ — область I, совпадениям сигналов от α -частиц в пластике с сигналами от α -частиц в $\text{CsI}(\text{Tl})$ — область II, проявляется еще третья

Рис. 2. Двумерная матрица событий для идентификации α -частиц и γ -квантов по форме импульса свечения сцинтиллятора CsI(Tl). По оси абсцисс – интегрирование незадержанных анодных сигналов, соответствующее энергии α - γ -излучения, по оси ординат – интегрирование анодных сигналов, задержанных на 200 нс, определяющее тип излучения.

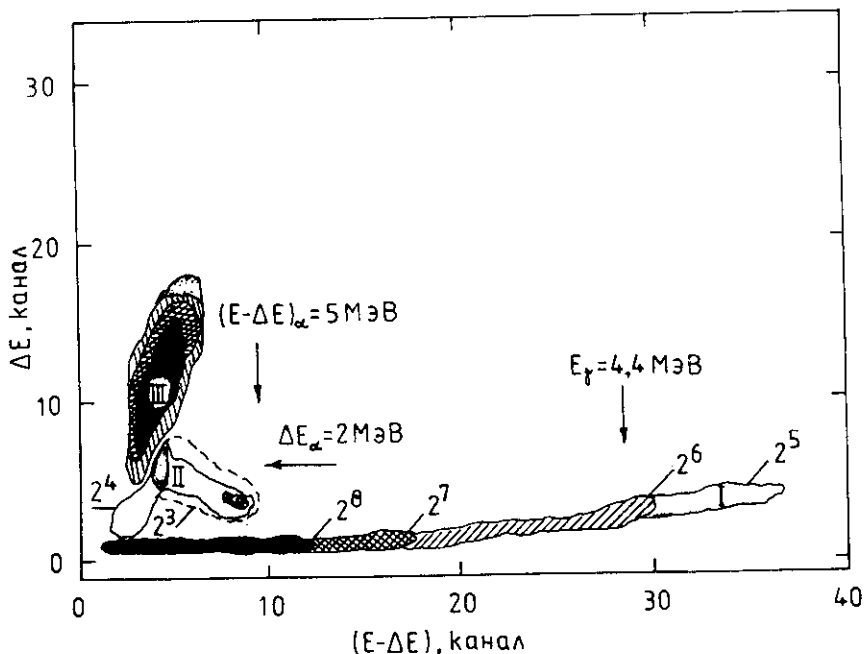
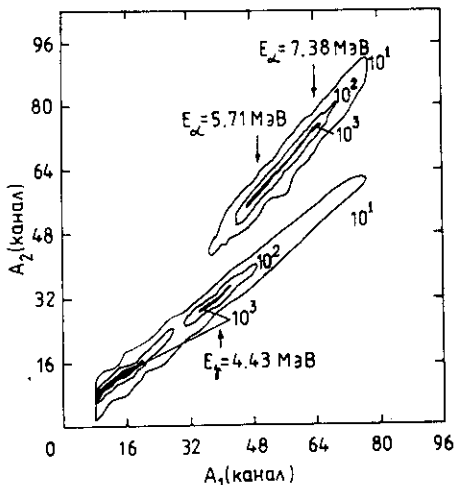


Рис. 3. Идентификация α -частиц и γ -квантов комбинированным сцинтилляционным детектором CsI(Tl) $\phi 50 \times 0,050 \text{ мм}^2$ + пластик $\phi 50 \times 50 \text{ мм}^2$ по разнице ионизационных потерь энергии в пролетном слое вещества. По оси абсцисс – интегрирование задержанных сигналов, дающих информацию об энергии γ -квантов и об остаточной энергии α -частиц. По оси ординат – интегрирование незадержанных сигналов, то есть определение сорта частиц по ионизационным потерям в тонком слое CsI(Tl).

область совпадений. В области III тонкий слой CsI(Tl) дает сигналы от α -частиц и в "ΔE"-тракте, и в "E-ΔE"-тракте одновременно, как и в случае одного кристалла CsI(Tl) (см. рис. 1а и рис. 2).

Вариант фосфича на основе эпитаксиальных структур алюмоиттриевого граната $Y_3Al_5O_{12}$ (рис. 1в), предназначенный в основном для регистрации более тяжелых частиц, оказался малоэффективным для разделения α - γ -излучения от данных источников из-за тонкого слоя граната (0,005 мм).

Тестовые эксперименты по разделению α -частиц и γ -квантов, возникающих в ядерной реакции, с использованием техники фосфич-детектора проводились в сравнении с экспериментами на Si-Si(Li) ΔE-E-телескопом. В реакции ^4He (36 МэВ) на тонкой мишени ^{209}Bi (2,6 мг/см²) одним из вероятных процессов является эмиссия α -частиц и γ -квантов¹⁷. Испытывались фосфич-детектор CsI(Tl) $\phi 50 \times 0,050$ мм² + пластик $\phi 50 \times 50$ мм² и полупроводниковый телескоп, состоящий из Si $\phi 18 \times 0,090$ мм² и Si(Li) $\phi 18 \times 1,2$ мм². Детекторы находились под углами +45° и -45° по отношению к направлению пучка α -частиц и имели одинаковые телесные углы, равные 0,018 ср. Энергия α -частиц после рассеяния на мишени измерялась монитором под углом 25°, пик упругого рассеяния наблюдался также и тестируемыми телескопами. Кроме того, в эксперименте измерялись энергетические спектры γ -квантов ВГО-детектором в зависимости от сработавшего тракта — телескопа, фосфича или монитора. Применение фосфич-детектора для выделения выходного канала реакции (γ , p, α ,...) в отличие от Si(Li)-телескопа позволило бы, например, регистрировать γ - γ -совпадения и сравнивать их с γ -p- или γ - α -совпадениями. Как было показано ранее¹⁸, эффективное выделение выходного канала реакции и сравнение с данными γ - γ -совпадений ("γ-старт") при изучении эмиссии жесткого γ -излучения имеет весьма важное значение.

На рис. 4, 5 приведены двумерные матрицы, полученные для телескопа и фосфича в одном эксперименте. Ненаблюдение протонов в использованной реакции связано со значительно меньшим их выходом по сравнению с α -частицами и недостаточно большим временем экспозиции. Две наиболее интенсивные области на рис. 4 соответствуют пику генератора и пику упругого рассеяния α -частиц на мишени. На рис. 5 область, обозначенная звездочкой, образована аналогично области III на рис. 3. По оси абсцисс на рис. 5 энергетическая шкала дана и для α -частиц, и для γ -квантов. Полученные результаты дают представление о возможности идентификации ионизирующих излучений с помощью техники фосфич-детектора. При качестве, сравнимом с качеством, обеспечиваемым полупроводниковым ΔE-E-телескопом, появляется дополнительная возможность регистрации γ -квантов.

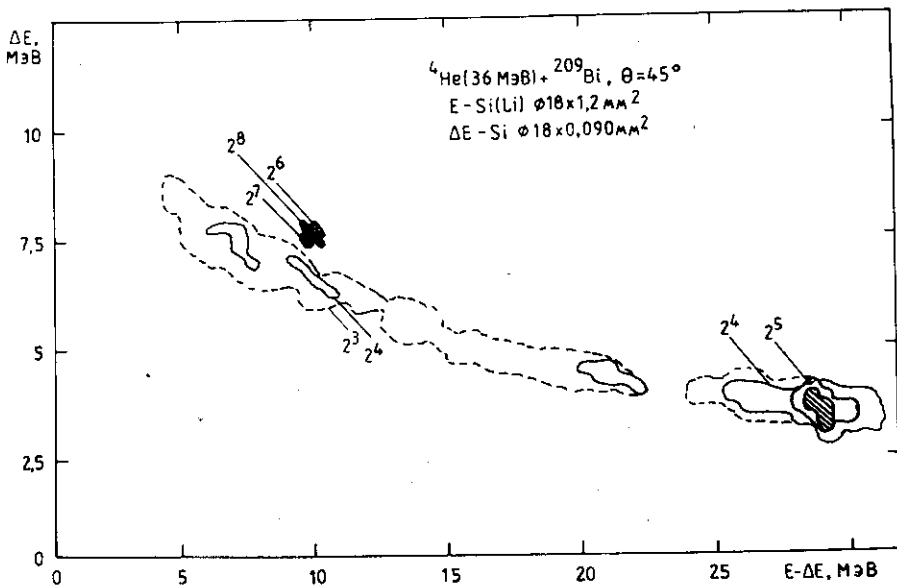


Рис. 4. Двумерная матрица событий регистрации α -частиц с энергией $E_{\alpha} \leq 36$ МэВ для полупроводникового Si-Si(Li)-телескопа.

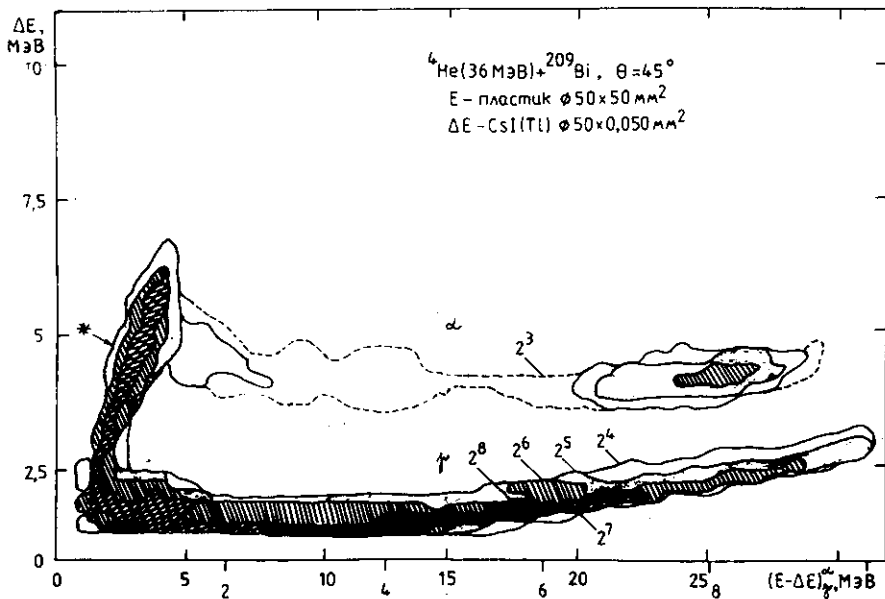


Рис. 5. Двумерная матрица событий регистрации α -частиц и γ -квантов с энергиями $E_{\alpha} \leq 36$ МэВ, $E_{\gamma} \geq 0,5$ МэВ сцинтиляционным фосфич-детектором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что для расширения диапазона регистрируемых частиц и улучшения качества сепарации перспективным является фосфич-детектор на основе монокристаллических структур иттрий-алюминиевого граната, состоящего из объемного сцинтиллятора и нанесенных на его поверхность методом жидкофазной эпитаксии пленочных сцинтилляторов с разными временами высвечивания (см. табл.). Толщины объемной и пленочных составляющих, технологически возможные для получения на сегодняшний день при максимальном диаметре 65 мм, равны соответственно $(0,5 \div 5)$ мм и $(1 \div 100)$ мкм.

Таблица. Некоторые характеристики составных компонент фосфич-детектора на основе алюмоиттриевого граната¹⁹

№	Активатор	Световой ход отн. NaI(Tl) ист. $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	Время свечения, нс	Максимум свечения, нм	$Z_{\text{эф}}$	ρ , г/см ³
1.	Sc	0,5	800+900	303		
2.	Pr	0,2	29	315	29	4,55
3.	Ce	0,18	70	540		
4.	Nd	0,15	3500	390		

Составными компонентами "трисфич"-детектора могут быть различные комбинации, например 1-2-3 или 1-4-3. Еще больше комбинаций для двухкомпонентного фосфич-детектора, на рис. 1в приведены временные сигналы с анода ФЭУ для комбинации 1-3. При оптимизации толщин всех слоев можно создать уникальный логарифмический детектор, регистрирующий легкие и средние заряженные частицы до $Z \ll \leq 25$ в широком энергетическом диапазоне.

Другим возможным направлением в совершенствовании техники фосфич-детектора является замена фотоэлектронных умножителей на фотодиоды, что позволяет придать детектору компактность и повысить качество сепарации¹⁰.

Авторы выражают благодарность Ю.Э.Пенионжкевичу и Х.Зодану за поддержку и постоянный интерес к работе, Г.Г.Чубаряну за полезные советы и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахперджанян А.Г. и др. – Препринт ОИЯИ Р13-87-760, Дубна, 1987.
2. Агаронян Ф.А. и др. – Препринт ОИЯИ Р13-87-15, Дубна, 1987.
3. Biggertaff J.A. et al. – NIM, 1961, 10, p.3271.
4. Wingard R.A. et al. – NIM, 1971, 95, p.141.
5. Pastor C. et al. – NIM, 1983, 212, p.209.
6. Alarja J. et al. – NIM, 1986, A242, p.352.
7. Barnett A.R., Lilley J.S. – Phys. Rev. C, 1974, v.9, No.5, p.2010.
8. Каманин В.В. и др. – Препринт ОИЯИ Р15-87-783, Дубна, 1987.
9. Волженская Л.Г. и др. – В сб.: Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по синтилляторам, Черкассы: Изд. ВНИИ монокристаллов, 1986, с.128.
10. Kreutz P. et al. – NIM, 1987, A260, p.120.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 февраля 1989 года.