



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2013-23
ОЭФ

Г.И. Бритвич¹, В.В. Бреховских¹, В.К. Семенов^{1,2}, С.А. Холоденко¹

Основные характеристики полистирольных сцинтилляторов производства ИФВЭ

Направлено в *ПТЭ*

¹ Институт Физики Высоких Энергий

² Институт Ядерных Исследований РАН

Протвино 2013

Аннотация

Бритвич Г.И. и др. Основные характеристики полистирольных сцинтилляторов производства ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 2013-23. – Протвино, 2013. – 38 с., 34 рис., 13 табл., библиогр.: 23.

Проведены измерения основных характеристик полистирольных сцинтилляторов. Сцинтилляторы, разработанные по новым технологиям в ИФВЭ, использованы в целом ряде экспериментов как на ускорителе ИФВЭ, так и на установках зарубежных физических центров (CERN, FNAL, BNL, DESY). Рассмотрены характерные особенности работы детекторов использующих систему сцинтиллятор — WLS волокно. Проведены измерения эффективности различных отражающих поверхностей, световыхода и временного разрешения сцинтилляционных детекторов.

Abstract

Britvich G.I. et al. Basic properties of polystyrene scintillators produced in IHEP: IHEP Preprint 2013-23. – Protvino, 2013. – p. 38, figs. 34, tables 13, refs.: 23.

Basic properties of polystyrene scintillators produced in IHEP were measured. The scintillators developed on new technologies in IHEP are used in a different experiments both on the IHEP accelerator and on experimental setups of foreign physical centers (CERN, FNAL, BNL, DESY). The characteristic features of the detectors with scintillator — WLS fiber system were considered. Measurements of reflective efficiency for different surfaces, light yield and time resolution of scintillating detectors were performed.

1. Введение

Производство полистирольных сцинтилляторов в ИФВЭ было начато около 30 лет назад. В начальный период была освоена технология изготовления сцинтилляторов методом крупноблочной термической полимеризацией с последующей механической обработкой и полировкой. Максимальные размеры сцинтилляторов составляли $2000 \times 500 \times 70$ мм³ при объемной прозрачности более двух метров. Следующим этапом была разработка и освоение новой технологии — экструдирования высокопрозрачных сцинтилляционных полос из крупноблочного сцинтиллятора [1][2].

В начале 2000-х годов в ИФВЭ был создан производственный участок для изготовления сцинтилляционных пластин на основе полистирольных гранул литьем под давлением, оснащенный современным промышленным оборудованием, позволяющим выпускать сцинтилляторы в объеме до 100 тонн в год [3]. Высокопрозрачные сцинтилляционные полосы и пластины, изготовленные по указанным технологиям нашли широкое применение в целом ряде экспериментов как на ускорителе ИФВЭ, так и на установках зарубежных физических центров (CERN, FNAL, BNL, DESY).

К настоящему времени в ИФВЭ разработаны и другие высокопроизводительные технологии изготовления сцинтилляторов, например, плавлением гранул в зеркальных формах.

2. Основные характеристики пластмассовых сцинтилляторов и измерение их световыхода

В Таблицах 1, 2 приведены результаты измерений временных характеристик и световыхода зарубежных сцинтилляторов [4]-[7] и сцинтилляторов (СЦ) разработанных и производимых в ИФВЭ литьем под давлением [3] и методом крупноблочной полимеризации [2]. Временные характеристики измерялись с помощью однофотодетекторной методики, подробно описанной в работе [8].

Таблица 1. Характеристики сцинтилляторов различных производителей.

Сцинтиллятор	Световыход % к Антрацену	τ_{Rise} нс	t_{Fast} нс	t_{Slow} нс	$T_{0.9}$ нс	$T_{0.95}$ нс
Антрацен	100	—	—	—	—	—
Стильбен	56	—	—	—	—	—
NE 104	68	1.3	1.8	27 (0.2%)	4.8	5.9
NE 110	53	1.5	2.4	16 (1%)	7.1	8.2
PILOT U	70	1.1	1.3	9 (1.9%)	4.3	5.0
BC-400	65	1.3	2.0	14 (1.0%)	5.8	6.7
BC-404	70	1.2	1.7	14 (0.9%)	5.1	5.9
BC-408	63	1.4	2.0	17 (0.8%)	5.9	6.8
SCSN-88	53	1.2	2.0	11 (4.5%)	6.8	8.5
СЦ-301 ИФВЭ	60	1.3	2.4	21 (4.2%)	11	19

Таблица 2. Характеристики сцинтилляторов, разработанных в ИФВЭ.

№	Матрица BASF 143E+добавки	СВ %	τ_{Rise} нс	t_{Fast} нс	t_{Slow} нс	$T_{0.9}$ нс	$T_{0.95}$ нс
СЦ-106	2% РТР + 0.02% аминок-Г-соль	56	1.4	1.3	9.8 (4.6%)	9.2	16.8
СЦ-203	2% РТР + 0.02% РОРОР	60	1.6	1.7	11.2 (4.2%)	10.0	17.3
СЦ-305	2% РРО + 0.02% РТР	54	1.7	1.8	8.9 (3.7%)	8.4	11.7
СЦ-408	2% РТР	55	1.2	1.3	8.9 (5.2%)	9.9	18.4
СЦ-503	2% РРО	52	1.3	1.5	6.3 (7.7%)	7.9	11.7
СЦ-607	2% РТР + 0.02% РРО	55	1.4	1.5	9.1 (5.5%)	9.5	16.4
СЦ-705	2% РТР + 0.02% салицилат Na	49	1.3	1.4	8.7 (5.5%)	9.3	17.1
СЦ-806	2% РТР + 0.02% РВД	56	1.4	1.4	9.2 (5.3%)	9.5	17.3
СЦ-907	2% РТР+0.02% РРО + 0.02% РВД	58	1.4	1.6	11.4 (4.0%)	9.4	16.7
СЦ-1006	2% РВД	67	1.2	1.4	9.5 (4.6%)	7.5	11.8

СВ — световыход в % к Антрацену.

τ_{Rise} — время нарастания сигнала от уровня 0.1 до уровня 0.9

t_{Fast} — первая экспонента времени спада.

t_{Slow} — вторая экспонента времени спада; в скобках приведена доля света медленной компоненты от полного световыхода [?, 8]

$T_{0.9}$ — время за которое собирается 90% общего заряда.

$T_{0.95}$ — время за которое собирается 95% общего заряда.

Для измерения световыхода и временных характеристик (см.п. 3.1) сцинтилляторов (Таблицы 1-2) изготавливались образцы $\varnothing 20$ мм из сцинтилляторов толщиной от 1 мм до 10 мм. Сцинтилляторы укладывались в контейнер из фторопласта с входным окном $\varnothing 8$ мм для пропускания электронов от радиоактивного источника и помещались без оптического контакта на входном окне фотоумножителя ХР2020, как показано на рис. 1. При этом выбор источника зависит от толщины сцинтиллятора.

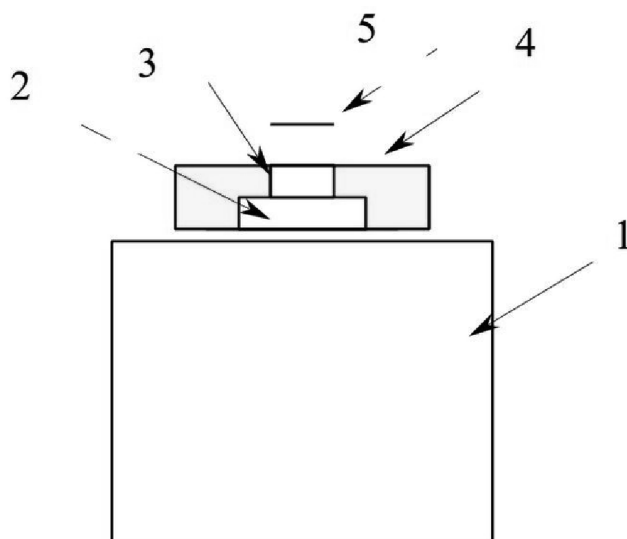


Рис. 1. Схема стенда для измерения относительного световыхода сцинтилляторов
1 - ФЭУ ХР2020; 2 - исследуемый образец; 3 - Отражающее покрытие; 4 - контейнер из фторопласта; 5 - радиоактивный источник.

При выборе методики измерения была преодолена техническая проблема связанная с полной засветкой ФЭУ в момент смены образцов. После включения высокого напряжения на ФЭУ, он выходит на стационарный режим в течение ≈ 3 часов. Таким образом, за рабочий день позволяет провести измерения не более 2-3 образцов. Режим строгого фиксирования времени выдержки и времени измерения, а также контрольного измерения с эталонным кристаллом антрацена (после серии из 5 образцов), позволил с погрешностью $\approx 3\%$ измерять до 30 образцов за смену.

2.1. Световыход пластиковых сцинтилляторов толщиной более 5 мм

Измерения световыхода сцинтилляторов толщиной более 5 мм и сравнение их с кристаллом антрацена проводилось по пику полного внутреннего поглощения электронов с энергией $E_e = 959$ кэВ от радиоактивного источника ^{207}Bi .

Таблица 3. Калибровочные значения энергий электронов для радиоактивного источника ^{207}Bi [9].

Мода γ	γ (кэВ)	γ (%)	E_e , кэВ
Pb $K_{\alpha 2}$	72.803	21.7	76.4*
Pb $K_{\alpha 2}$	74.969	36.5	
Pb $K_{\beta 2}$	84.789	12.9	
Pb $K_{\beta 2}$	84.632	3.72	

*) за счет фотоэффекта $E_e = \langle E \rangle_{\gamma} - 0.284$ кэВ, где 0.284 кэВ - энергия К-оболочки углерода

Таблица 4. Электроны внутренней конверсии E_{eIC} , кэВ [9].

E_{eIC}	e (%)	$\langle E_{eIC} \rangle$	ΔE *	$E_{eIC} - \Delta E$
481	1.57	481	16.8	464
553 — 569	0.58	$\langle 561 \rangle$	16.8	544
975	7.33	975	16.2	959
1047	1.45	1047		
1048 — 1050	0.417	$\langle 1049 \rangle \langle 1051 \rangle$	16.1	1034
1059	0.349	1059		
1060 - 1063	0.235	$\langle 1062 \rangle$		
1682 - 1767	0.0301	$\langle 1725 \rangle$	16.0	1709

*) включены потери:

в воздухе между источником и кристаллом антрацена;

в майларовом окне кристалла;

в защитной пленке источника ^{207}Bi ;

На рис. 2 представлены спектры энерговыделения в антрацене и СИ-301. Калибровка энергетической шкалы спектрометра была проведена на электронах с энергиями от 76.4 кэВ до 1709 кэВ, см. Таблицы 3-4.

Зависимость энергетического разрешения антрацена от энергии электронов описывается зависимостью, показанной на рис. 3. Она играет важную роль в самой методике измерений, т.к. позволяет следить (в нашем случае в течение последних 15 лет) за изменением качества эталонного кристалла антрацена.

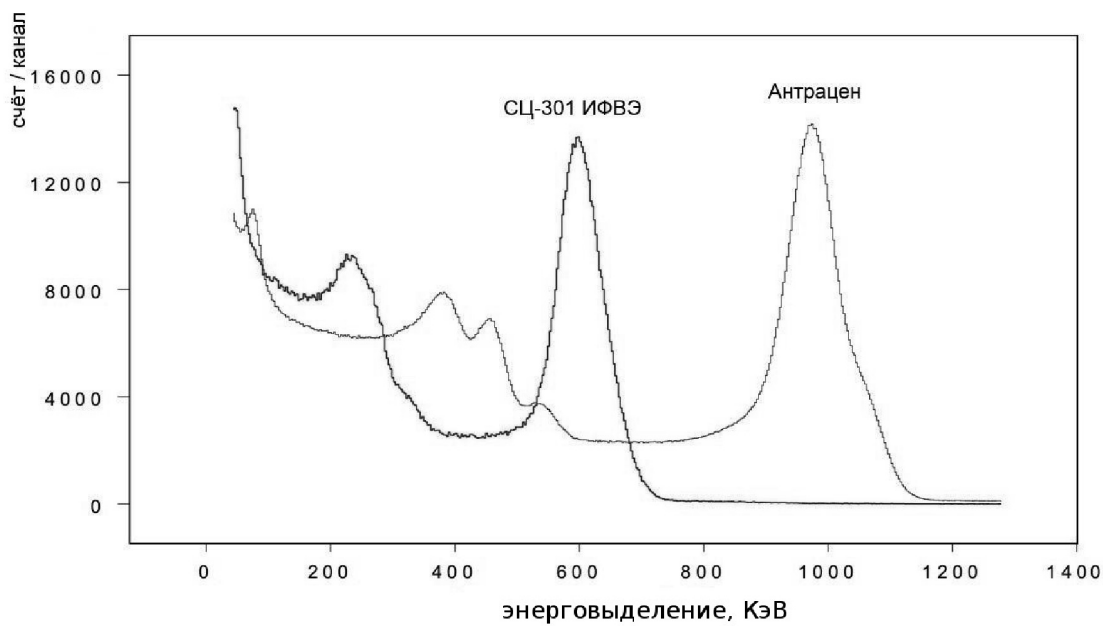


Рис. 2. Спектры энерговыведения в антрацене и СЦ-301 ИФВЭ от радиоактивного источника ^{207}Bi .

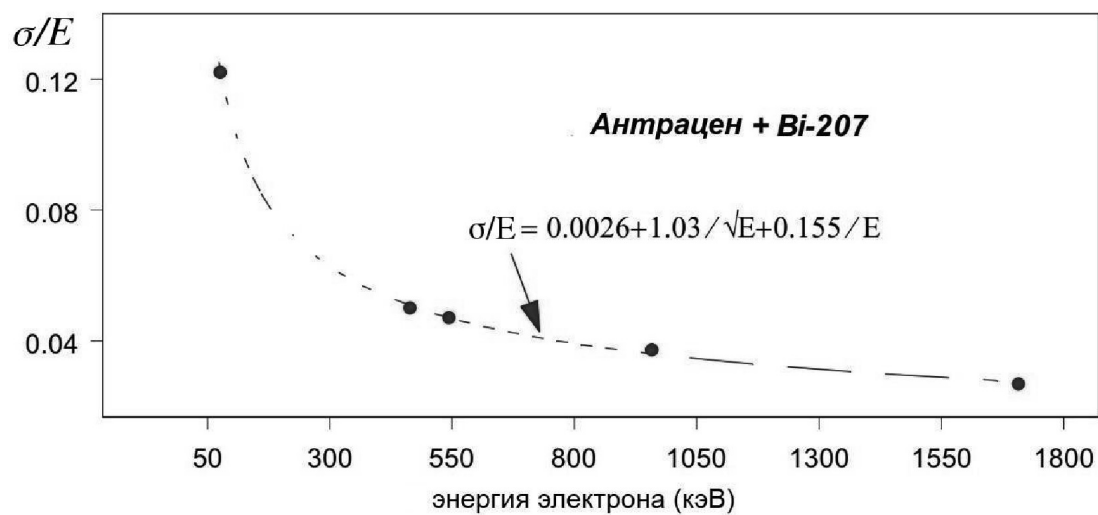


Рис. 3. Зависимость энергетического разрешения кристалла антрацена, измеренное с помощью источника ^{207}Bi .

2.2. Световойход пластиковых сцинтилляторов толщиной менее 5 мм и методы его измерения

На основании данных из работы [10] по величинам экстраполированного пробега электронов в плексигласе R_{ext} (г/см²), можно определить как R_{ext} (см) для полистирольного сцинтиллятора в диапазоне энергий электронов 0.01 МэВ — 10 МэВ с погрешностью не выше 5% по эмпирическим формулам:

$$0.01 \leq E_e \leq 0.1 \quad R_{ext} = 0.7863 \times E_e^{1.808} \quad (1)$$

$$0.1 \leq E_e \leq 0.7 \quad R_{ext} = 0.4764 \times E_e^{1.56} \quad (2)$$

$$0.7 \leq E_e \leq 10 \quad R_{ext} = 0.4083 \times E_e^{1.136} \quad (3)$$

Максимальный пробег (R_{max}) моноэнергетических электронов можно принять

$$R_{max} = 1.3 \times R_{ext} \quad (4)$$

Такое значение пробега R_{max} дает верхнюю (консервативную) оценку максимального пробега. На основании формулы (2) и с учетом (4), для $E_e = 0.959$ МэВ сцинтилляторы должны иметь толщину не менее 5 мм.

Для сцинтилляторов толщиной менее 5 мм используется радиоактивный источник ^{241}Am с γ -квантами с энергией 59.540 кэВ [7], которые в результате фотоэффекта оставляют в сцинтилляторе энергию $E_e = 59.540 - 0.284 = 59.26$ кэВ.

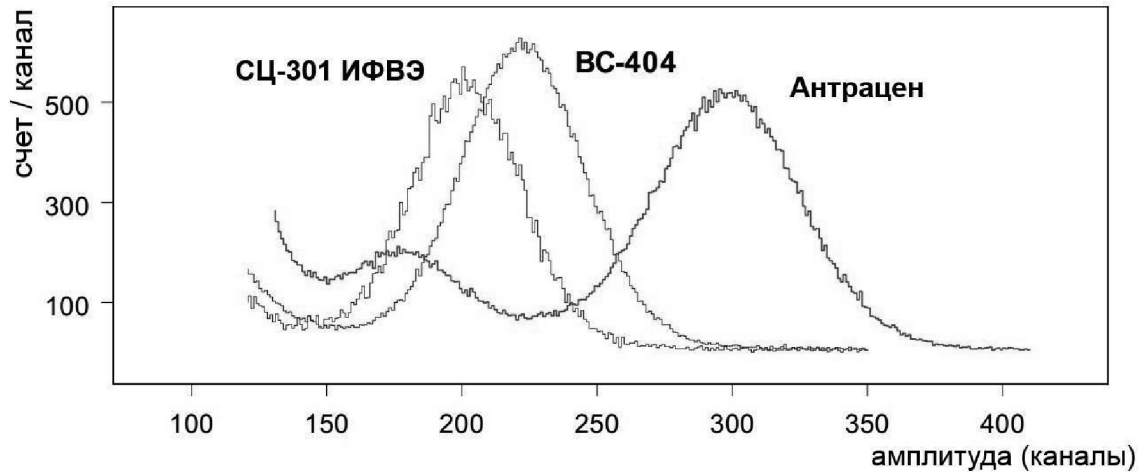


Рис. 4. Спектры энергоснабжения в антрацене, сцинтилляторах ВС-404 и СЦ-301 ИФВЭ толщиной 3 мм от радиоактивного источника ^{241}Am . Световойход определяется по положению пика полного поглощения от электронов с энергиями $E_e = 59.26$ кэВ.

Хотя в сцинтилляторе при данной энергии сечение комптоновского рассеяния σ больше сечения фотоэффекта τ ($\sigma/\tau \approx 34$ [6]), средняя энергия комптоновских электронов $E_c \approx 6$ кэВ, и они практически не выделяются в амплитудном спектре на фоне шумов ФЭУ, поэтому наблюдаемый пик в спектре представленном на рис. 4 обусловлен только фотоэффектом. При этом длина свободного пробега γ -квантов с энергией $E_\gamma \approx 60$ кэВ составляет величину $\Lambda \approx 5$ см [8], т.е. позволяет использовать сцинтилляторы любой толщины, в том числе и толщиной менее 5 мм. На рис. 4, в качестве примера, представлены спектры для сцинтилляторов СЦ-301 ИФВЭ и ВС-404 толщиной 3 мм в сравнении с кристаллом антрацена.

3. Характеристики систем сцинтиллятор — переизлучающее ВОЛОКНО

Кроме традиционных областей применения сцинтилляторов, таких как ядерная физика, физика высоких энергий, радиохимический анализ, терапия, дозиметрия, геофизика и так далее, в последние 20 лет, и в особенности после 11 сентября 2001 года, интенсивно разрабатываются методы обнаружения скрытых взрывчатых, радиоактивных и делящихся материалов [9]-[13]. Выбор метода зависит, в первую очередь, от энергии детектируемых нейтронов или гамма-квантов в конкретной области исследований. Эти новые области применения требуют создания детекторов чувствительных к слабым потокам нейтронов и гамма-квантов, т.е. обладающих не только высокой эффективностью регистрации отдельных частиц, но и большой чувствительной площадью.

В настоящем разделе описана методика тестирования сцинтилляционного детектора, в котором светосбор с пластин из пластических сцинтилляторов осуществляется переизлучающими волокнами WLS (Wave Length Shifter). В физике высоких энергий данный метод обладает столь большими преимуществами перед традиционным методом, использующим пластические сцинтилляторы (СЦ) со светосбором непосредственно на фотоприемник, что в значительной мере вытеснил его в детекторах экспериментальных установок в области физики высоких энергий.

В процессе изготовления большинства таких детекторов, как правило, используются WLS волокна: Y11 [5], BCF-92 [3] и В-2[5]. Качественно принцип работы системы СЦ — WLS волокно поясняется на рис. 5. От ионизирующей частицы в сцинтилляторе возникает свет со спектром эмиссии $S_{СЦ}(\lambda)$. Часть света, которая выходит из сцинтиллятора и попадает в WLS волокно поглощается им и переизлучается в соответствии с соотношениями между спектрами излучения $S_{СЦ}(\lambda)$, поглощения $S_{abs}(\lambda)$ и эмиссии $S_{em}(\lambda)$ спектросмещающего волокна. Переизлученный свет распространяется вдоль волокна и достигает ФЭУ.

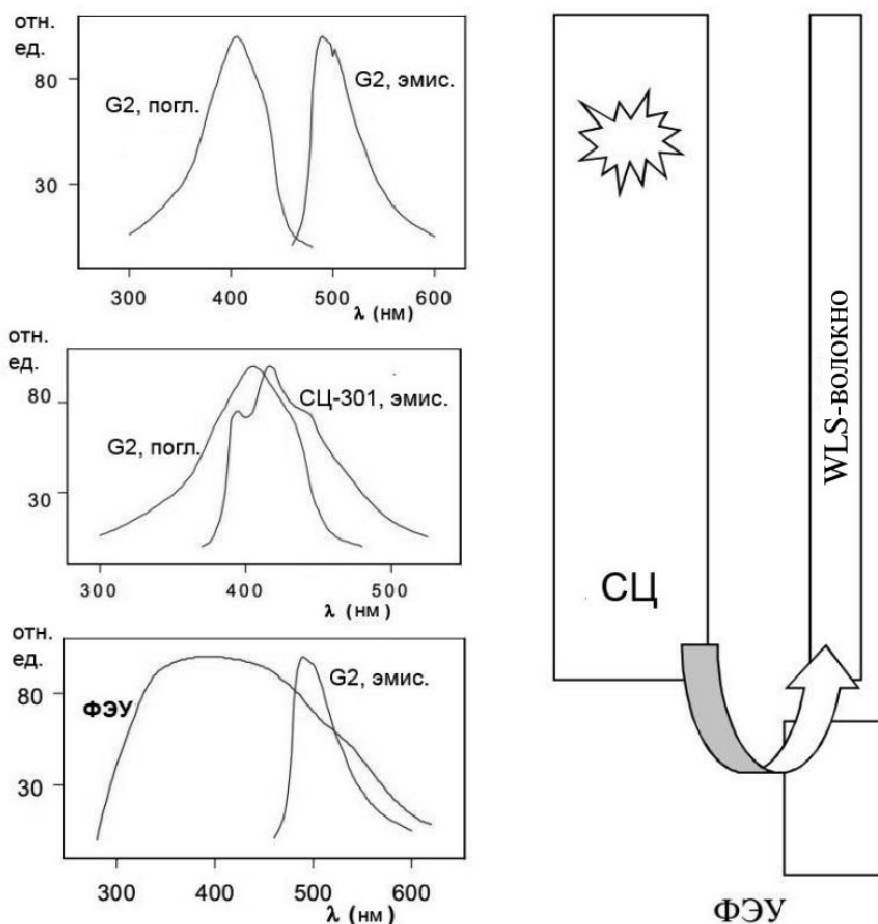


Рис. 5. Принцип работы системы СЦ + WLS волокно + ФЭУ.

На верхнем рисунке приведены спектры эмиссии и поглощения WLS волокна BCF-92 со спектросмещающей добавкой типа G2.

На среднем — спектры поглощения WLS волокна BCF-92 и эмиссии СЦ-301 ИФВЭ.

На нижнем — спектры эмиссии волокна и квантового выхода ФЭУ с бищелочным фотокаатодом.

На рис. 6 показана схема измерения световыхода сцинтиллятора имеющего поперечное сечение $40 \times 10 \text{ мм}^2$ и длиной $\approx 2.5 \text{ м}$ (сцинтилляционный стрип с диффузной отражающей оболочкой, изготовленный на экструдере ФНАЛ). По всей длине сцинтиллятора сделана канавка шириной 2 мм и глубиной 2.5 мм, в которую укладывается WLS волокно Y11(200) $\varnothing 1 \text{ мм}$. Волокно вклеено оптическим клеем не по всей длине, а только в локальных точках с шагом $\approx 40 \text{ см}$. Космические мюоны, выделяются триггерными счетчиками C_1, C_2 . Свет от мюонов, пересекающих сцинтиллятор толщиной 1 см, регистрируется ФЭУ ЕМ1 9954КВ, который имеет повышенный квантовый выход в области $S_{Em}(\lambda)$ волокна (т.н. green-extended ФЭУ — с продленной в зеленую область чувствительностью фотокаатода).

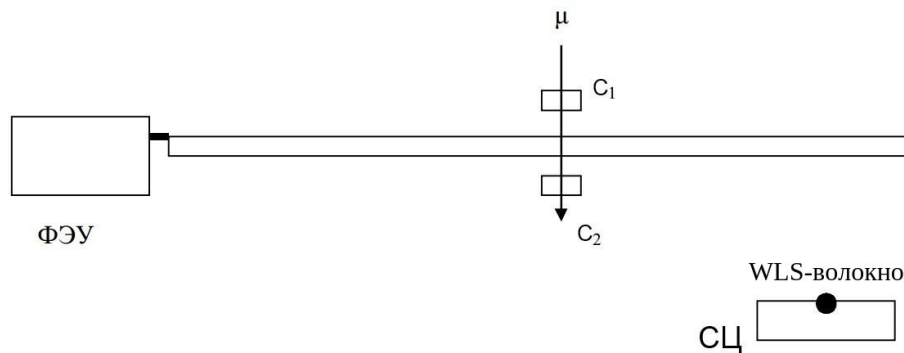


Рис. 6. Схема измерения световыхода, иллюстрирующего принцип работы системы СЦ + WLS волокно + ФЭУ.

Зависимость числа зарегистрированных фотоэлектронов от расстояния до ФЭУ (см. рис. 7) имеет экспоненциальный характер вида

$$I = I_0 \times \exp(-x/\Lambda)$$

где Λ - параметр ослабления (прозрачность волокна).

Для точек вблизи вклейки (Фит А) $\Lambda_A = 1/0.004093 = 244$ см

Для наиболее удаленных от места вклейки точек (Фит Б) $\Lambda_B = 1/0.004005 = 250$ см.

Поскольку параметры Λ_A и Λ_B совпадают с погрешностью $\approx 3\%$ — можно оценить эффект вклейки как $\eta = 9.382/6.346 = 1.48$. Многократные исследования различных комбинаций СЦ с WLS волокнами дают значение $\eta = 1.57 \pm 0.04$.

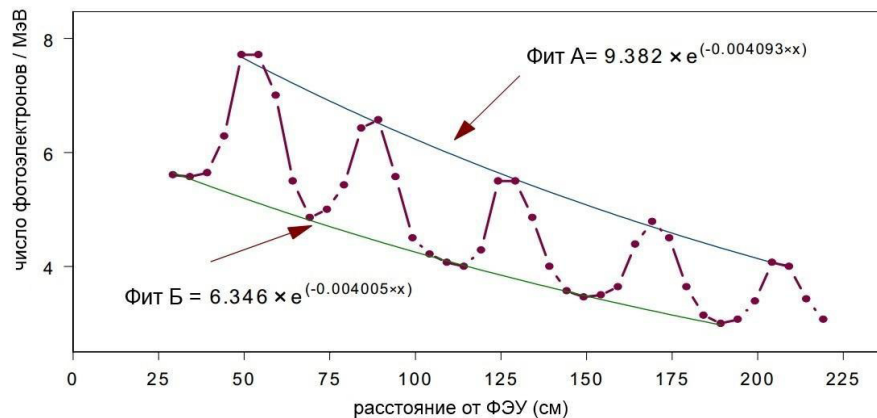


Рис. 7. Зависимость числа фотоэлектронов $N_{p.e.}$ от расстояния X между координатой прохождения мюонов и ФЭУ. Сплошные линии результат фита:

Фит А — для максимальных, Фит Б — для минимальных значений $N_{p.e.}(X)$.

Для оценки ослабления света в сцинтиляторе рассмотрим точки вклейки как локальные источники светосбора из сцинтилятора (см. рис. 8 и рис. 9). При этом 5 пиков совмещаются в один по центрам тяжести и нормируются. В результате получаем $\Lambda_{\text{сц}} \approx 4$ см.

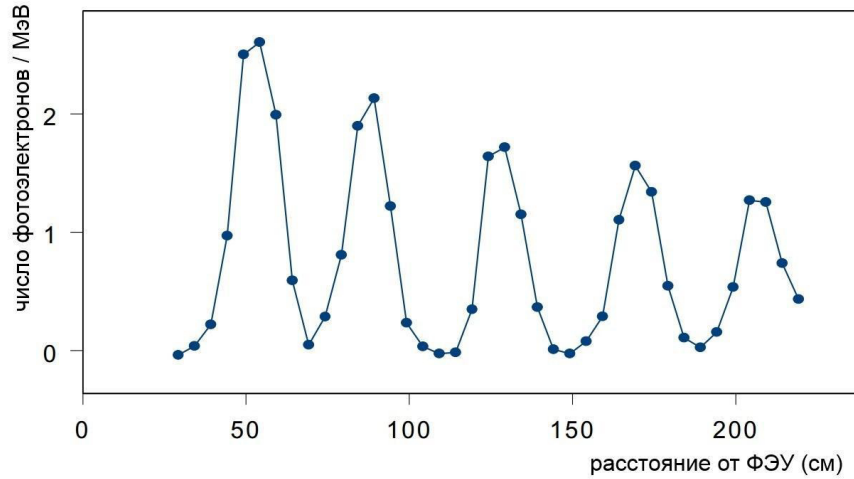


Рис. 8. ($N_{p.e.}$ — Фит Б) по данным, представленным на рис.7.

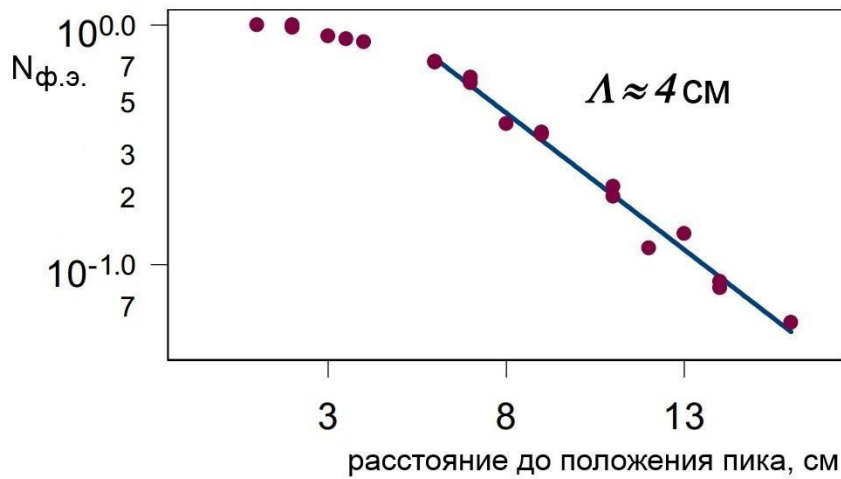


Рис. 9. Число фотоэлектронов $N_{p.e.}$, определенное по Фиту Б (5 пиков совмещены по центрам тяжести в один с нормировкой по абсолютной величине пиков). Сплошная линия – фит функцией $\exp(-x/\Lambda)$, где $\Lambda \approx 4$ см — длина ослабления света в сцинтиляторе.

Анализ такого эксперимента наглядно показывает следующее:

- распространение света в системе СЦ — WLS волокно целиком определяется Λ_{WLS} , а не $\Lambda_{СЦ}$ (в этом состоит принципиальное отличие от СЦ — ФЭУ системы)
- вклейка волокна в сцинтиллятор увеличивает светосбор примерно в 1.6 раза.

3.1. Сравнительные характеристики WLS волокон

Дальнейшие исследования характеристик световыхода системы СЦ — WLS волокно были выполнены на стендах, изображенных на рис. 10 и рис. 11. Методика измерения времен высвечивания для систем СЦ — WLS волокно, как и для сцинтилляторов (см. Таблицы 1,2 в п. 2) описана нами ранее, в частности, в работе [8]. Исследования проводились с различными сцинтилляторами для трех типов волокон: В-2, ВСF-92, Y11(200). Спектры поглощения волокон и спектры эмиссии сцинтиллятора СЦ-301 ИФВЭ приведены на рис. 12.

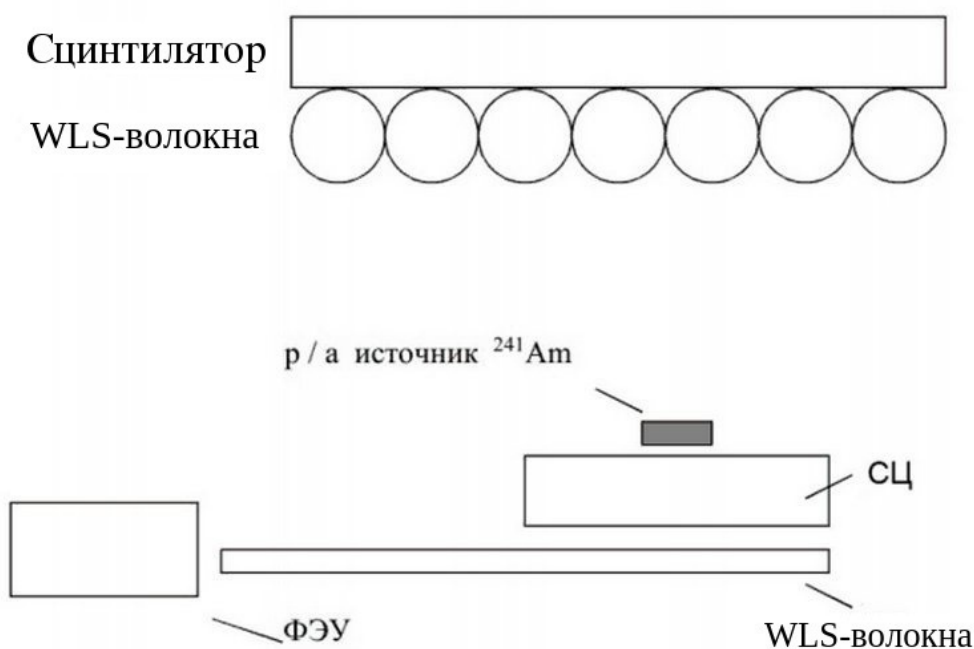


Рис. 10. Образцы СЦ $\varnothing 20$ мм, толщиной 5 мм уложены на плоскость из 20 волокон $\varnothing 1$ мм.

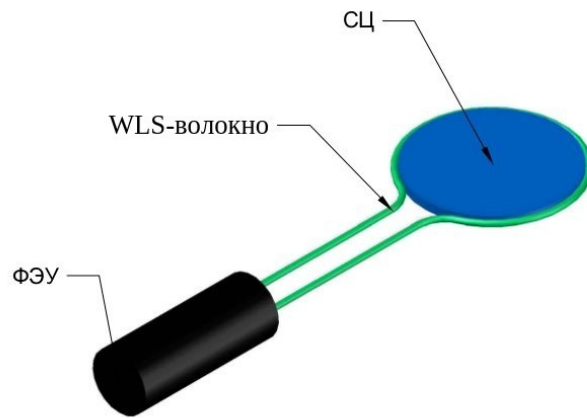


Рис. 11. СЦ размерами $\varnothing 50 \times 3$ мм “просматривается” через волокно расположенное на торцевой части СЦ.

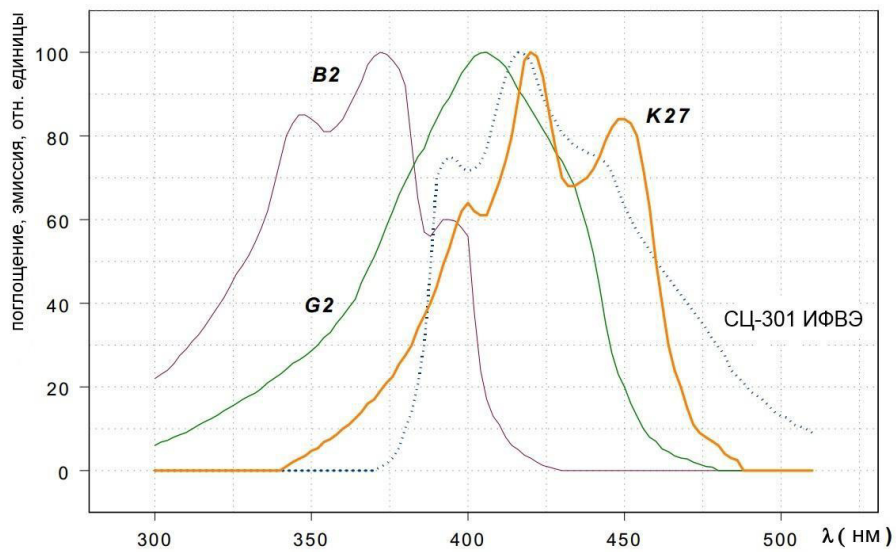


Рис. 12. Спектры поглощения волокон типа В2 и ВСF-92, Y11 (со спектро смещающими добавками соответственно G2 и K27) и спектр эмиссии сцинтиллятора СЦ-301 ИФВЭ.

Результаты исследований представлены на рис. 13-16 и в Таблицах 5–9.

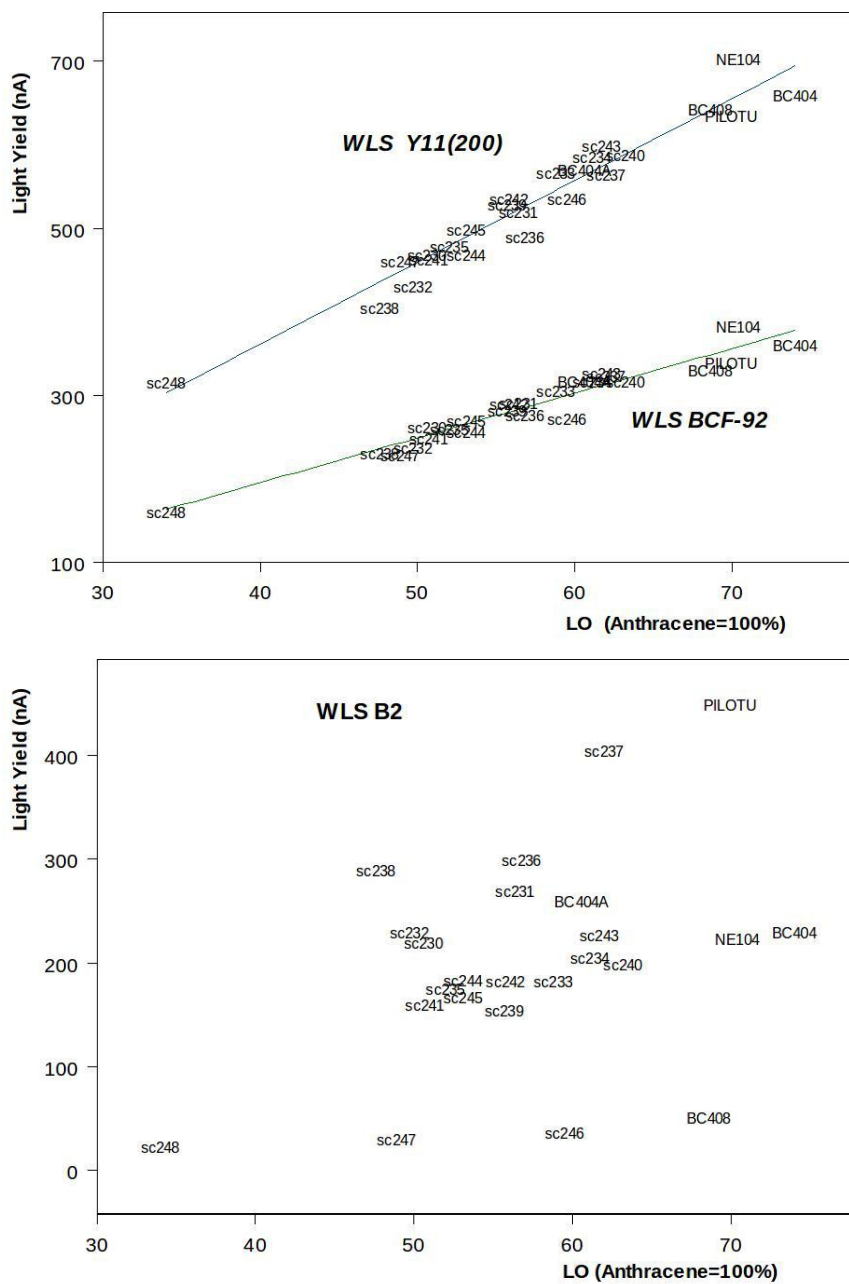


Рис. 13. Относительный световыход (ток ФЭУ) для комбинаций СЦ — WLS волокно в зависимости от световыхода сцинтилляторов в геометрии, представленной на рис. 10. Световыход Антрацена 100%. Данные приведены в Таблице 5. Верхний рисунок — для WLS волокон BCF-92 и Y11(200). Нижний рисунок — для волокна В-2.

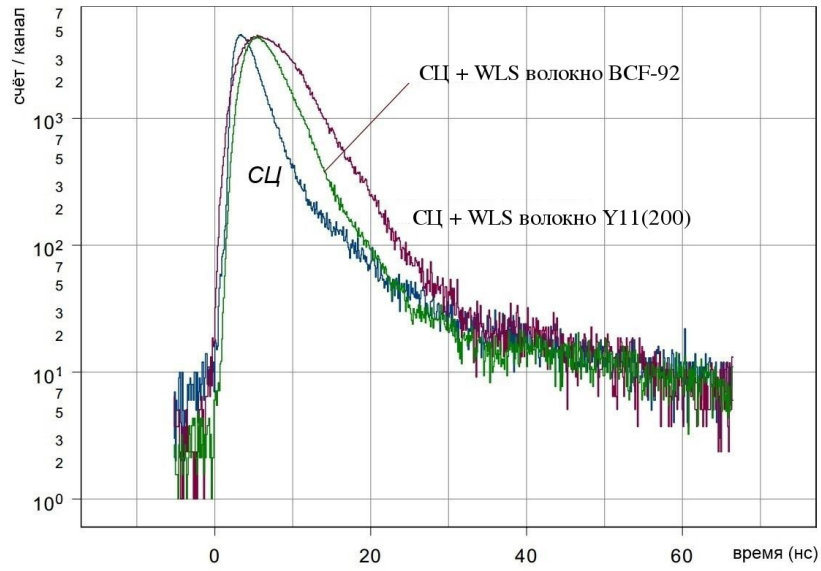


Рис. 14. Временной спектр высвечивания СЦ-301 ИФВЭ в сравнении со спектрами, полученными для комбинации СЦ-301 — WLS волокно.

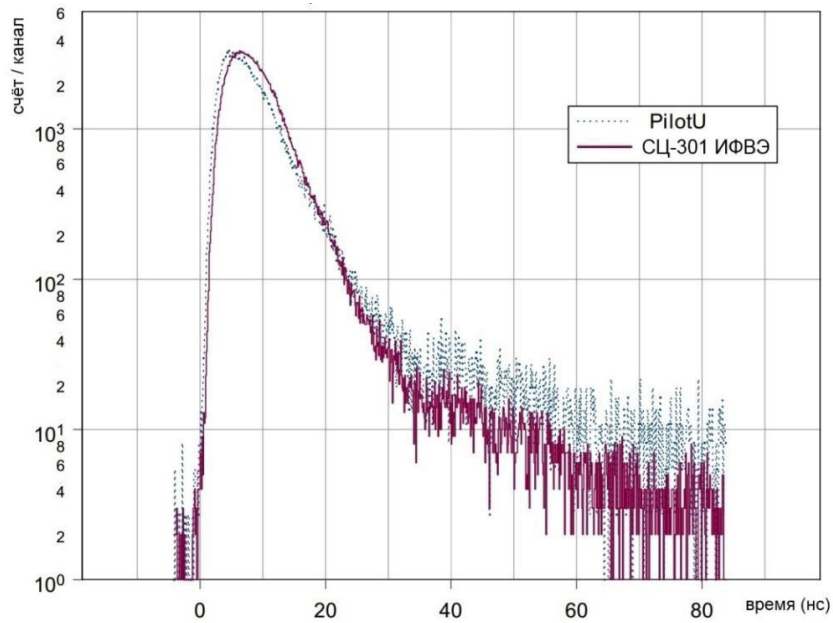


Рис. 15. Временные спектры высвечивания сцинтилляторов СЦ-301 ИФВЭ и PilotU в комбинации с волокном Y11(200).

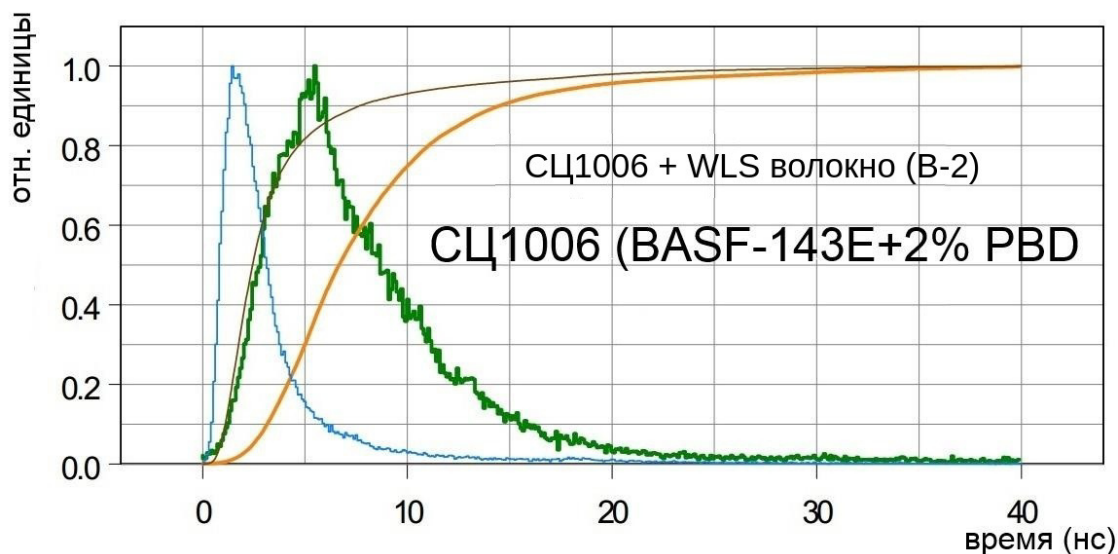


Рис. 16. Формы световых сигналов от одного из самых быстрых сцинтилляторов СЦ-1006 и от системы со спектросмещающим волокном (СЦ1006 – В2), а также их интегралов по времени.

На рис. 13 для измерений с волокнами Y11 и BCF-92 можно выделить три серии сцинтилляторов (СЦ-238, СЦ-237, PilotU), (BC-404, NE104, СЦ-240, СЦ-234) и (BC-408, СЦ-246, СЦ-247), для которых имеет место линейная зависимость световых пар от относительного световыхода самих сцинтилляторов. В то время, как для волокна В-2 линейной зависимости для всех типов сцинтилляторов не наблюдается.

Качественно (см. рис. 12) это можно объяснить следующим образом: спектросмещающие добавки G2 и K27 перехватывают свет в широкой области $\lambda \approx (350 \div 470)$ нм, т.е. из области, где высвечивают большинство сцинтилляторов, отсюда и появляется зависимость. Волокно В-2 напротив перехватывает свет в узкой коротковолновой области $\lambda \approx (320 \div 400)$ нм, в которой высвечивают свет небольшой класс сцинтилляторов, типа PilotU, т.е. В-2 более избирательно “видит” спектры высвечивания сцинтилляторов.

Из полученных данных можно сделать выводы:

1. При использовании WLS волокон содержащих спектросмещающие добавки типа G2 и K27 и для всех типов сцинтилляторов представленных в Таблице 1, наблюдается линейная зависимость тока ФЭУ(нА) от световыхода сцинтиллятора (см. рис. 13).
2. Из Таблицы 5 следует, что $LY(Y11)/LY(BCF-92) = 1.85 \pm 0.07$

Таблица 5. Световыход (СВ) сцинтилляторов в % от световыхода Антрацена и ток ФЭУ при использовании различных типов волокон в геометрии, представленной на рис. 10.

Сцинтиллятор	СВ	Ток ФЭУ, нА			α^*
		B2	BCF-92	Y11	
BC-404	74	230	361	660	1.83
BC-404A	61	260	318	571	1.80
BC-408	69	52	331	643	1.94
NE104	70	224	384	704	1.83
PILOTU	70	450	340	635	1.87
СЦ-230	51	220	263	469	1.78
СЦ-231	56	270	292	521	1.78
СЦ-232	50	230	239	431	1.80
СЦ-233	59	183	306	567	1.85
СЦ-234	61	206	318	586	1.84
СЦ-235	52	176	261	479	1.84
СЦ-236	57	300	277	491	1.77
СЦ-237	62	405	324	565	1.74
СЦ-238	48	290	232	406	1.75
СЦ-239	56	155	283	530	1.87
СЦ-240	63	200	318	589	1.85
СЦ-241	51	161	250	464	1.86
СЦ-242	56	183	291	536	1.84
СЦ-243	62	228	328	600	1.83
СЦ-244	53	184	258	469	1.82
СЦ-245	53	168	271	500	1.85
СЦ-246	60	38	273	536	1.96
СЦ-247	49	31	230	461	2.00
СЦ-248	34	24	161	316	1.96

*) $\alpha = \text{СВ}(Y11) / \text{СВ}(BCF-92)$, $\langle \alpha \rangle = 1.85 \pm 0.07$

Таблица 6. Характеристики сцинтилляторов различных производителей в комбинации СЦ — WLS волокно BCF-92. Спектрсмещающая добавка G2, однооболочечное волокно.

Сцинтиллятор	Световыход м, ф.э. ^a	Световыход м, ф.э. ^b	τ_{Rise} (нс)	τ_{Fast} (нс)	τ_{Slow} (нс)	$T_{0.9}$ (нс)	$T_{0.95}$ (нс)
NE 104	5.6	—	2.9	3.3	24 (1.5%)	14	18
NE 110	3.9	—	3.1	4.2	39 (0.9%)	16	21
PILOT U	4.8	—	2.8	3.3	34 (0.9%)	13	17
BC-400	4.4	8.6	3.7	3.4	24 (1.3%)	15	19
BC-404	5.5	10.5	3.6	3.3	48 (0.7%)	14	19
BC-408	5.0	9.4	3.6	3.6	50 (0.6%)	15	19
SCSN-88	3.9	6.0	3.2	3.8	21 (4.0%)	18	26
СЦ-301 ИФВЭ	4.5	—	2.2	3.1	34 (0.8%)	13	17

Таблица 7. Характеристики сцинтилляторов различных производителей в комбинации СЦ — WLS волокно (Y11(200)M). Спектрсмещающая добавка K27. Многооболочечное волокно.

Сцинтиллятор	Световыход м, ф.э. ^a	Световыход м, ф.э. ^b	τ_{Rise} (нс)	τ_{Fast} (нс)	τ_{Slow} (нс)	$T_{0.9}$ (нс)	$T_{0.95}$ (нс)
NE 104	10.3	—	4.0	9.0	9.2 (15%)	26	34
NE 110	7.2	—	4.3	9.8	11 (20%)	28	35
PILOT U	9.0	—	3.7	8.5	11 (13%)	26	33
BC-400	8.7	12.3	4.0	9.3	11 (12%)	27	34
BC-404	9.8	14.3	4.0	8.3	11 (9%)	26	33
BC-408	9.6	12.7	4.1	9.0	9.2 (7%)	27	34
SCSN-88	6.8	8.4	4.2	9.6	12 (18.6%)	30	38
СЦ-301 ИФВЭ	8.1	—					

Таблица 8. Характеристики сцинтилляторов различных производителей в комбинации СЦ — WLS волокно (B-2(200)M). Многооболочечное волокно.

Сцинтиллятор	Световыход м, ф.э. ^a	Световыход м, ф.э. ^b	τ_{Rise} (нс)	τ_{Fast} (нс)	τ_{Slow} (нс)	$T_{0.9}$ (нс)	$T_{0.95}$ (нс)
NE 104	7.1	—	2.7	3.7	20 (0.8%)	14	18
NE 110	1.5	—	3.5	5.0	28 (0.7%)	16	20
PILOT U	12.1	—	2.9	4.1	31 (0.9%)	14	19
BC-400	2.0	0.3	3.2	4.4	48 (0.8%)	16	20
BC-404	5.0	2.7	3.1	3.8	17 (2.0%)	14	19
BC-408	1.9	2.8	3.3	4.4	17 (0.4%)	15	19
SCSN-88	6.7	1.8	3.1	4.7	27 (3.1%)	19	27
СЦ-301 ИФВЭ	2.0	—	3.4	4.9	15 (0.1%)	17	23

Таблица 9. Характеристики экспериментальных образцов в комбинации СЦ — WLS волокно (B-2).

Сцинтиллятор	Световыход м, ф.э. ^a	τ_{Rise} (нс)	τ_{Fast} (нс)	τ_{Slow} (нс)	$T_{0.9}$ (нс)	$T_{0.95}$ (нс)
СЦ-106	6.6	3.5	4.4	4.4 (6.8%)	15.2	19.9
СЦ-408	4.6	3.4	4.8	14.5 (0.06%)	16.6	22.6
СЦ-503	6.3	3.5	4.6	5.6 (0.001%)	14.9	18.5
СЦ-705	3.6	3.5	4.4	6.6 (0.001%)	16.0	22.0
СЦ-806	5.1	3.5	4.6	8.3 (0.001%)	15.8	21.4
СЦ-1006	6.9	3.4	4.7	5.6 (0.001%)	14.3	18.3
СЦ-203	2.0	—	—	—	—	—
СЦ-305	1.7	—	—	—	—	—
СЦ-607	6.1	—	—	—	—	—
СЦ-907	4.1	—	—	—	—	—

Таблица 10. Характеристики экспериментальных образцов в комбинации
СЦ — WLS волокно (BCF-92).

Матрица	Добавки	Световыход, ф.э.
BASF-143E	2%РТР+0.02%РОРОР(FLUKA)	3.4
BASF-165H	2%РТР+0.02%РОРОР(Харьков)	3.6
BASF-165H	2%РТР(лазер)+0.02%РОРОР(FLUKA)	3.0
BASF-158K	2%РТР(лазер)+0.02%РОРОР(FLUKA)	3.1
BASF-165H	2%РВР(Ростов на Дону)+0.02%РОРОР(FLUKA)	4.0
BASF-158K	2%РВР(Ростов на Дону)+0.02%РОРОР(FLUKA)	3.4

В Таблицах 6-10 — результаты получены в геометрии, представленной на рис. 11, а в Таблице 10 — для минимальной ионизирующей частицы (мюон с импульсом $P = 1.5$ ГэВ/с, проходящий сквозь образцовую пластину толщиной 2 мм). При этом использовались следующие обозначения:

Световыход m — средний световыход фотоэлектронов.

a — ФЭУ THORN EMI 9954KB с бищелочным фотокатодом.

b — ФЭУ THORN EMI 9903KB с рубидиевым бищелочным фотокатодом.

τ_{Rise} — время нарастания сигнала от уровня 0.1 до уровня 0.9

τ_{Fast} — первая экспонента времени спада

τ_{Slow} — вторая экспонента времени спада

$T_{0.9}$ — время за которое собирается 90% общего заряда

$T_{0.95}$ — время за которое собирается 95% общего заряда

Из анализа результатов, представленных в Таблицах 6—9 и на рис. 14—16 для комбинаций СЦ — WLS волокна, в сравнении с временными характеристиками для сцинтилляторов из Таблицы 1 следует:

B2 и G2 — быстрые добавки у которых все временные параметры приблизительно совпадают. Так, например, $T_{0.9}$ увеличивается с 5 нс до 15 нс, т.е. в 3 раза. τ_{Slow} компонента также увеличивается, но ее вклад в интегральный заряд сигнала остается на прежнем уровне $\approx 1\%$.

K27 — медленная добавка, которая увеличивает $T_{0.9}$ с 5 нс до 30 нс, т.е. в 6 раз, при этом вклад τ_{Slow} компоненты увеличивается в ≈ 10 раз. Объясняется это тем, что в пластических сцинтилляторах τ_{Slow} связана, как правило, с длинноволновой частью спектра эмиссии, в которой добавка K27 перехватывает свет лучше, чем добавки B2 и G2 (см. рис. 14), т.е. K27 избирательно сильнее видит τ_{Slow} компоненту. На рис. 15, в качестве иллюстрации, приведены спектры высвечивания для сцинтиллятора СЦ-301 ИФВЭ и PILOT-U в комбинации с волокном Y11(200). PILOT-U — один из самых быстрых сцинтилляторов, но относительно большой вклад компоненты τ_{Slow} приводит к тому, что в комбинации с волокном Y11(200) он становится сравним с СЦ-301 ИФВЭ — типичным, по временным характеристикам сцинтиллятором.

Т.о. время высвечивания, на примере сцинтиллятора СЦ-301 ИФВЭ в комбинации с WLS волокнами BCF-92 и Y11(200), представленные на рис. 14, отражают общую картину в поведении временных характеристик комбинаций СЦ — WLS волокно:

- WLS волокна затягивают время нарастания переднего фронта и смещают максимум времени высвечивания;
- WLS волокна затягивают как быструю (τ_{Fast}) так и медленную (τ_{Slow}) компоненты высвечивания (по сравнению со сцинтиллятором).

4. Сравнительные характеристики различных отражающих поверхностей

Выбор отражающих покрытий играет важную роль для увеличения световыхода (СВ), но особую, если не определяющую, при разработке детектора, работающего в спектрометрической моде. В этом случае неоднородность светосбора по всей площади детектора вносит основной вклад в энергетическое разрешение спектрометра.

Проведены измерения качества отражающих поверхностей. Для этого использовался стенд, схема которого приведена на рис. 11. На сцинтиллятор сверху и снизу укладывались диски различных отражателей. Источником излучения служил коллимированный ($\varnothing 8$ мм) пучок электронов в центре сцинтиллятора с $\langle E_e \rangle = 1.4$ МэВ от ^{106}Ru .

В Таблице 11 приведены полученные результаты качества отражающих поверхностей и их сравнение с результатами полученными в работе [14]. Стоит отметить, что в работе [14] использовался сцинтиллятор BC-408 размером $10 \times 20 \times 1$ см³ с 4 канавками (шаг 20 мм), в которые клеивались 4 WLS волокна BCF-91A, а источником излучения служили электроны внутренней конверсии от ^{207}Bi .

Существует два источника неоднородности.

1. Продольная неоднородность — определяется целиком прозрачностью волокна — Λ_{WLS} . При этом максимальная длина сцинтиллятора L_{MAX} , на которой можно скомпенсировать неоднородность определяется как:

$$L_{MAX} = \Lambda_{WLS} \cdot \ln(k1/k2)$$

где $k1, k2$ — коэффициенты отражения для покрытий на дальнем и ближнем к ФЭУ краях сцинтиллятора соответственно.

2. Поперечная неоднородность — определяется, в основном, прозрачностью сцинтиллятора $\Lambda_{СЦ}$, до конца устранить нельзя — можно только уменьшить за счет уменьшения расстояния между волокнами.

Таблица 11. Качество отражающих покрытий для системы СЦ-301 ИФВЭ — WLS волокно Y11(200) и BC-408 — BCF-91A.

Материал покрытия	Наст. работа	[14]*
Tyvek	100	100
Tyvek UV	103	—
Teflon	—	98
HEM 3M	95	—
Миллипор	94	—
Майлар с Al напылением:		98
Двухсторонний	94	—
Односторонний	86	85
Al фольга	74	75
Скотч с Al покрытием	74	—
Бумага офисная Балет	77	—
Бумага офисная	74	—
Свинец полированный	73	—
Tedlar	60	—
Бумага черная	60	—
Черный пластик	—	46
Скотч бумажный черный	30	—
Без покрытия	53	48

Следует отметить, что сравнительный анализ характеристик различных комбинаций СЦ — WLS волокно должен проводиться по параметрам непосредственно связанными с поставленной задачей. Например, если целью является проектирование детектора с максимальной чувствительностью к нейтронам, то сравнение комбинаций СЦ — WLS волокно можно вести лишь по параметру СВ.

5. Квантовый выход комбинаций пластических сцинтилляторов со спектрсдвигающими волокнами и фотоприемником (СЦ — WLS волокно — ФЭУ)

Одним из основных параметров детектора является квантовый выход ω [ф.э./МэВ] — число фотоэлектронов зарегистрированных ФЭУ на 1 МэВ выделенной в сцинтилляторе энергии. Для наших детекторов величина ω зависит от конкретных конструктивных особенностей (т.е. от поставленной задачи) и варьируется от 10 ф.э./МэВ до 70 ф.э./МэВ, оставаясь неизменной для конкретной конструкции. Так, например, для партии гамма спектрометров в количестве 900 штук, произведенных в 2008 году, разброс ω составил $\pm 7\%$.

5.1. Фотоприемники света от спектросмещающих волокон

Тот факт, что WLS волокна излучают свет, как правило, в длинноволновой области, требует избирательный подход к выбору фотоприемника. Ведущие мировые и отечественные производители освоили выпуск ФЭУ с повышенным квантовым выходом для $\lambda > 500$ нм (т.н. green-extended ФЭУ). Основные характеристики таких ФЭУ и систем WLS волокно — ФЭУ показаны на рис. 17 и в Таблице 12.

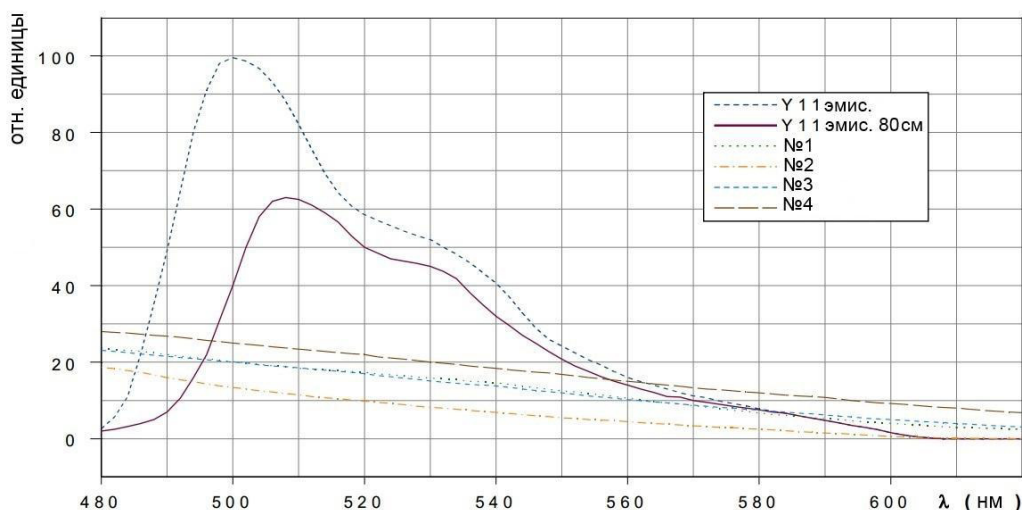


Рис. 17. Спектры эмиссии $S(\lambda)$ для WLS волокна Y11(200):
 пунктир – на расстоянии 5 см от входного окна ФЭУ;
 сплошная - на расстоянии $L=80$ см
 Квантовые выходы $\rho(\lambda)$ для четырех типов ФЭУ с бищелочными фотокатодами:
 1 – EMI 9902B; 2 – R7723, R329 (Стандартный); 3 – R329EG (green-extended);
 4 - R329EGPX (Экспериментальный образец green-extended).

Таблица 12. Сравнение откликов ФЭУ, работающих в комбинации со спектросмещающими волокнами (СЦ — WLS волокно — ФЭУ).

ФЭУ	Тип фэу	$\rho_{INT}, \%$	$\lambda_{EFF}, \text{нм}$
9902KB	Продленный в зеленую область	16.1	526
R7723, R329	стандартный	9.1	521
R329EG	Продленный в зеленую область	15.8	516
R329EGPX	Продленный в зеленую область	20.7	521

$S(\lambda)$ — спектр эмиссии Y11(200) на расстоянии 80 см от источника света до входного окна ФЭУ (рис. 17).

$$\rho_{INT} = \int S(\lambda)\rho(\lambda)d\lambda / \int S(\lambda)d\lambda$$

$$\lambda_{EFF} = \int S(\lambda)\rho(\lambda)\lambda d\lambda / \int S(\lambda)\rho(\lambda)d\lambda$$

Анализ представленных характеристик ФЭУ показывает, что интегральный квантовый выход лучших образцов ФЭУ с чувствительностью продленной в зеленую область в ≈ 2 раза выше, чем для стандартных бищелочных ФЭУ, т.е. ФЭУ вносит существенный вклад в световыход детектора. Поэтому остановимся подробнее на методике выбора ФЭУ для системы СИ — WLS волокно.

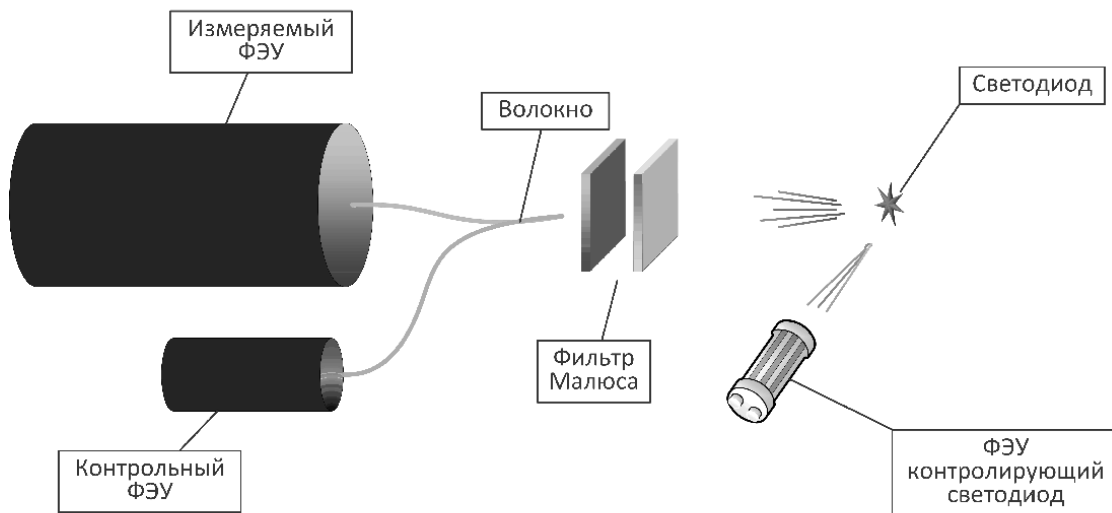


Рис. 18. Блок-схема установки для выделения одноэлектронных импульсов с помощью схемы совпадения.

Для большинства ФЭУ одноэлектронная компонента шумов относительно мала по интенсивности или сильно искажена импульсами другого происхождения. Поэтому для измерения характеристик спектра одноэлектронного отклика (СОО) применяется слабая подсветка [15] — [19], как показано на рис. 18.

Спектр однофотоэлектронного сигнала хорошо описывается гауссианом, т.к. для

одного фотоэлектрона вылетевшего с фото катода и попавшего на первый диод, при коэффициенте усиления $G \sim 10^6$ на аноде ФЭУ собирается заряд $Q \approx 10^6$ электронов. Причем, как хорошо известно, разрешение однофотоэлектронного сигнала определяется флуктуациями коэффициента усиления G с относительным среднеквадратичным разбросом $\approx (1+1/s)^{0.5}$, где s — коэффициент вторичной эмиссии первого диода при полном числе диодов $\gg 1$.

Тогда для среднего числа фотоэлектронов m , попавших на первый диод ФЭУ, относительное стандартное отклонение сигнала Q на его выходе $\approx ((1+1/s)/m)^{0.5}$. Последняя формула обычно и используется для оценки числа фотоэлектронов m .

Метод А: При $m > 10$ используется приведенная выше формула, когда распределение Пуассона, с достаточной точностью переходит в Гаусса.

Метод Б: Для ФЭУ, у которых нет ярко выраженного однофотонного спектра.

Из закона Пуассона $P(k) = m^k e^{-m} / k!$ следует, что $P(0) = e^{-m}$ — вероятность событий для $k=0$. Или $P(0) = N_{ped} / N_{trig}$ равно числу пьедесталов при полном числе запусков N_{trig} .

Погрешность измерения m определяется для данного метода, в основном, двумя факторами:

Случайные совпадения F_{random}

$$F_{random} = f_{darkcurrent} \times f_{trigger} \times \tau_{Gate} \quad (5)$$

а с другой стороны, частота полезных событий:

$$(1 - P(0)) \times f_{trigger} \approx m \times f_{trigger} \quad (6)$$

подставляя (6) в (5) получаем относительный вклад случайных совпадений в число полезных событий $= f_{darkcurrent} \times \tau_{Gate} / m$. Для нашей установки: $f_{darkcurrent} = 3$ кГц, $\tau_{Gate} = 100$ нс, рабочая область измерения $1 < m < 6$, что определяет вклад случайных совпадений от 3×10^{-4} до 5×10^{-5} .

Статистика: погрешность оценки m

$$m = -\ln(N_{ped} / N_{trig})$$

подчиняется биномиальному распределению, откуда

$$\sigma_{N_{ped}}^2 = N_{trig} \times P(0) \times (1 - P(0))$$

Для определения m с точностью 1%, т.е. $\Delta m = 0.01m$, необходимо регистрировать N_{trig} не менее

$$N_{trig} = \frac{(1-e^{-m})}{e^{-m}} \times (1 - e^{-0.01m})^2$$

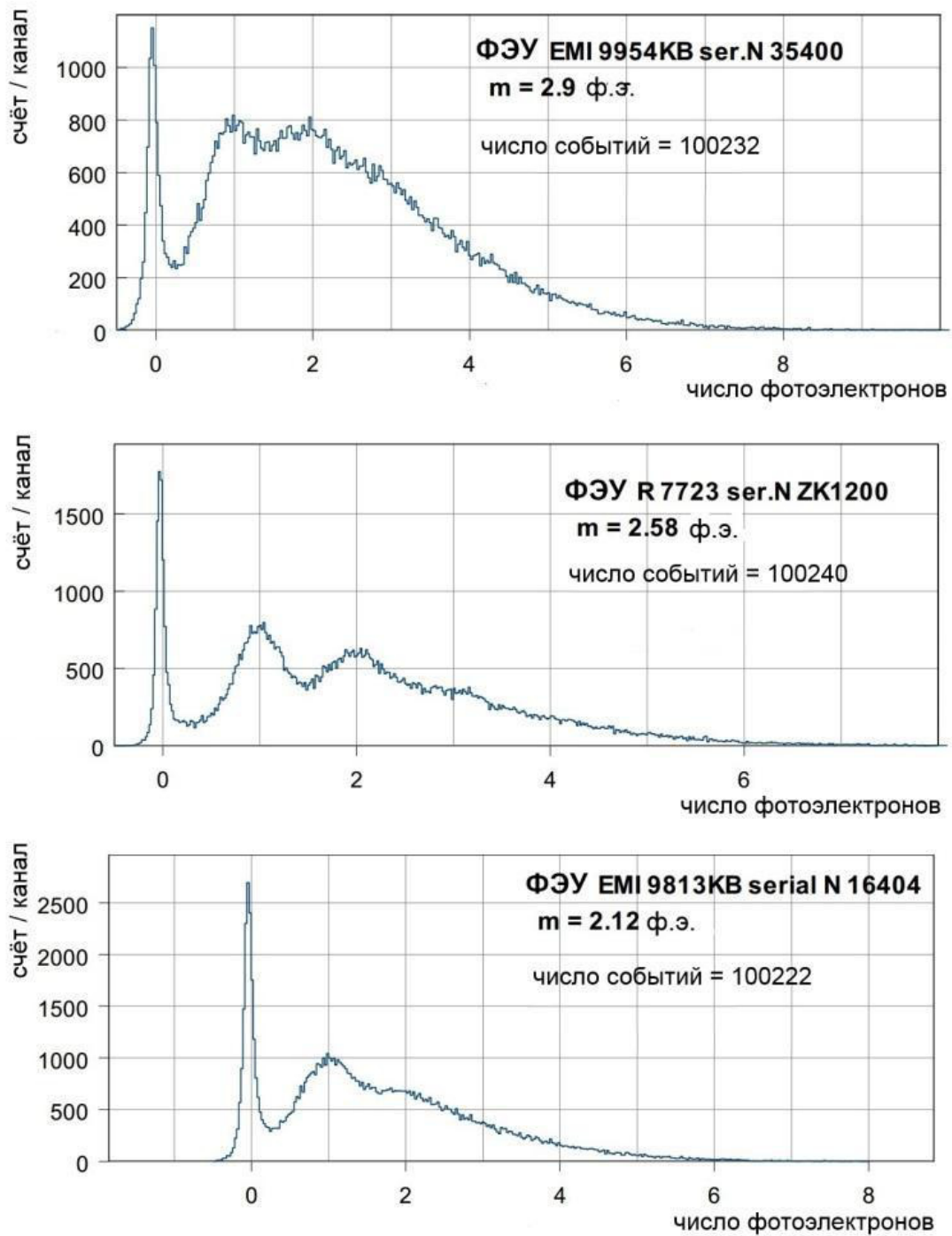


Рис. 19. Амплитудные спектры сигналов на выходе ФЭУ при засветке фотокатода слабыми световыми импульсами, выбивающими из фотокатодов до трех фотоэлектронов.

На рис. 20 представлена зависимость числа триггерных событий от числа фотоэлектронов, необходимого для оценки числа фотоэлектронов с точностью 1%.

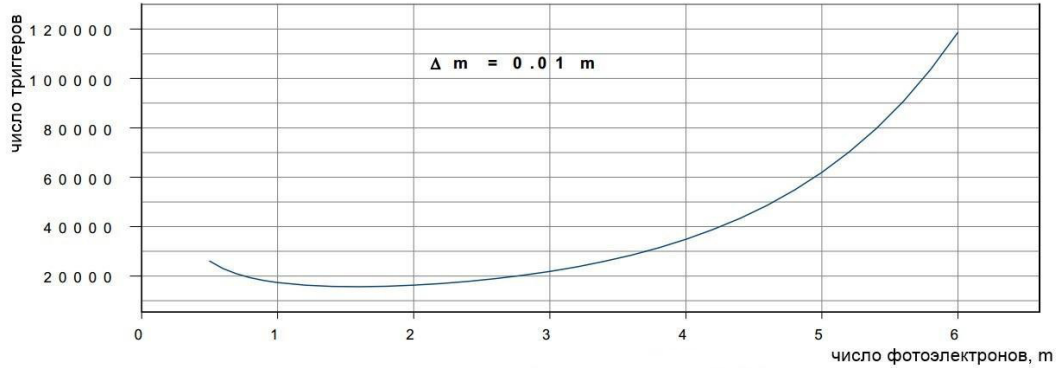


Рис. 20. Необходимое число триггерных событий для оценки числа фотоэлектронов с точностью 1%.

Определив число фотоэлектронов m , переходим к калибровке шкалы АЦП в размерности: число каналов АЦП на один фотоэлектрон. В измеренном спектре определим центр тяжести n^* начиная с $n = \mu_{ped} + 2 \cdot FWHM$, где FWHM - полная ширина на полувысоте пьедестальных событий. С другой стороны, если центр тяжести одноэлектронных событий μ , то

$$n^* = \frac{P(0) + P(1)\mu + P(2)2\mu + \dots}{P(1) + P(2) + \dots} = \mu \cdot m / (1 - P(0)) \quad (7)$$

откуда $\mu = n^* / N$, где $N = m / (1 - P(0))$

Метод АБ — комбинированный метод, позволяющий продлить калибровку(7) в методе Б до значений $m \sim 200$. В методе два определяющих фактора:

Во-первых, в качестве опорного фотоумножителя используется ФЭУ R7723 с хорошим однофотонным спектром (см. рис. 19).

Во-вторых, интенсивность света, падающего на фотокатод ФЭУ меняется в 500 раз за счет использования двух поляризационных фильтров Малюса по закону:

$$I = I_0 \times \cos^2 \varphi$$

Угол поворота φ фиксируется с точностью ± 0.5 минуты, что позволяет определять минимальную яркость (на практике это угол $\varphi = 87^\circ$) с погрешностью не хуже 0.5%.

На первом этапе измерений, с помощью опорного ФЭУ, проводится калибровка вида $m = k \times f(\varphi)$ во всем диапазоне интенсивностей с использованием выше приведенных формул.

На втором этапе опорный ФЭУ заменяется на тестируемый ФЭУ, у которого нет ярко выраженного однофотонного пика, и по формуле (7) определяем

$$m = k_{test} \cdot f(\varphi) \text{ для } m < 6$$

т.е. фактически измеряем отношение ρ_{INT} (опорный ФЭУ) / ρ_{INT} (Тест ФЭУ).

Затем полученное соотношение переносим на весь диапазон яркостей и определяем $(1 + 1/s)^{0.5}$ для тестируемого ФЭУ.

В заключение приводим характеристики некоторых конструктивных особенностей соединения ФЭУ с жгутом из волокон, представленные на рис. 21 —23.

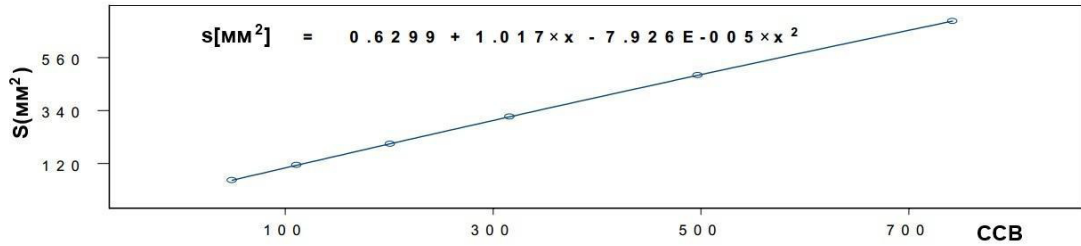


Рис. 21. Зависимость площади (S) отверстия от количества(x) WLS волокон $\varnothing 1$ мм, которые можно упаковать в это отверстие.

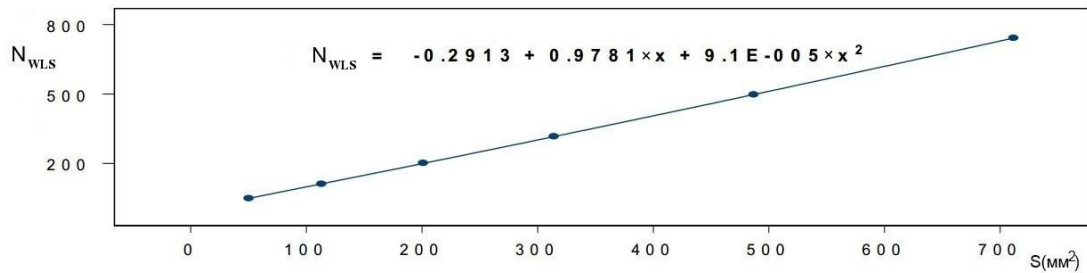


Рис. 22. Зависимость количества WLS волокон N_{WLS} $\varnothing 1$ мм от площади (S) отверстия, в которое можно упаковать эти волокна.

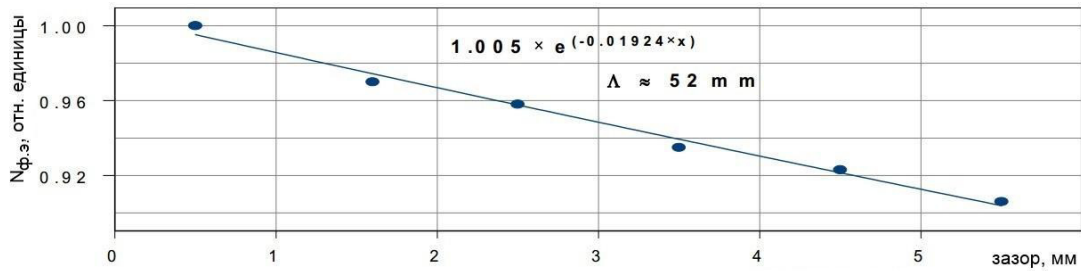


Рис. 23. Зависимость относительного числа фотоэлектронов $N_{p.e.}$ от величины зазора между торцом жгута волокон ($\varnothing 5$ мм) и фотокатодом ФЭУ ($\varnothing 40$ мм).

5.2. Измерение квантового выход ω [ф.э./МэВ]

Измерение величины ω реализовано в схеме калибровки детектора на моноэнергетических электронах — в схеме сцинтилляционного комптоновского спектрометра [24]. Импульсы со сцинтилляционного детектора поступают на амплитудный анализатор только в том случае, если рассеянный в детекторе γ -квант под углом $\approx 180^\circ$ регистрируется во втором детекторе т.н. схемой γe совпадений см. рис. 24.

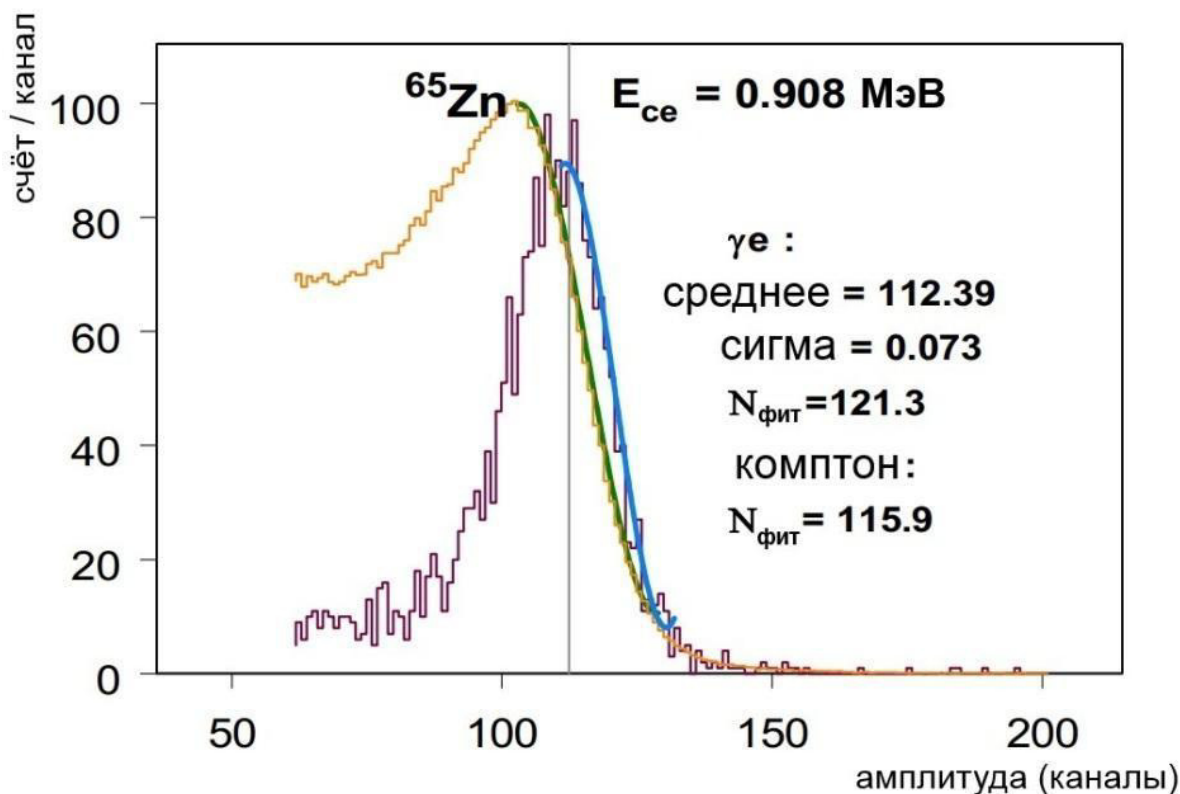


Рис. 24. Спектр энергосодержания в детекторе от γ -квантов радиоактивного источника ^{65}Zn в двух модах работы спектрометра:

Compton — режим самозапуска; γe — режим совпадений.

Сплошные линии — фит: $dN/dE = a_0 + a_1E + a_2E^2 + a_3E^3$.

Продельвая последовательно калибровку на гамма-источниках с различной энергией, получаем значение ω , см. рис. 25.

Получив значение ω для конкретного изделия (фактически паспорт детектора) можно получить рабочую характеристику, например транспортного портала [25], см. рис. 26.

$$\omega = (15.7 \pm 0.5) \text{ ф.э./МэВ}$$

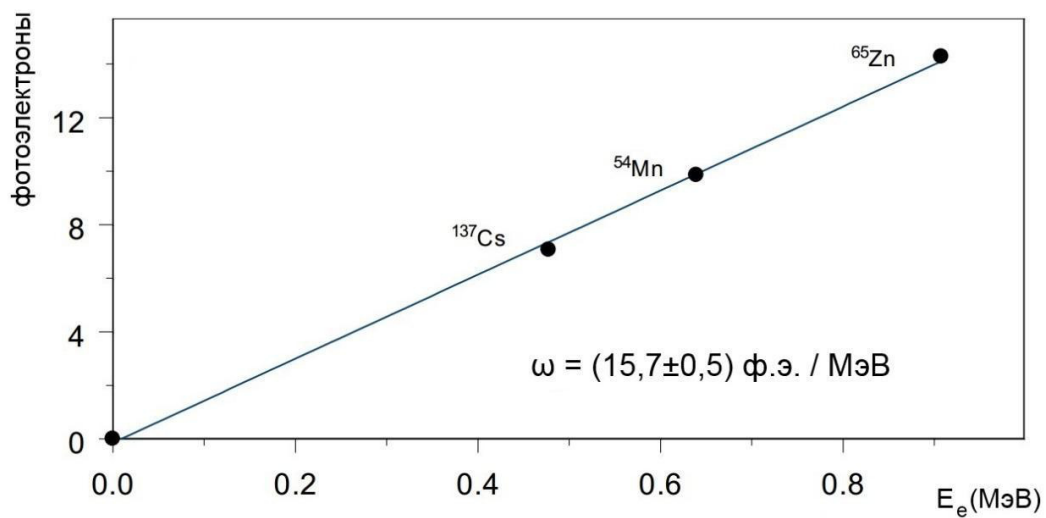


Рис. 25. Пример калибровки одного из изделий.

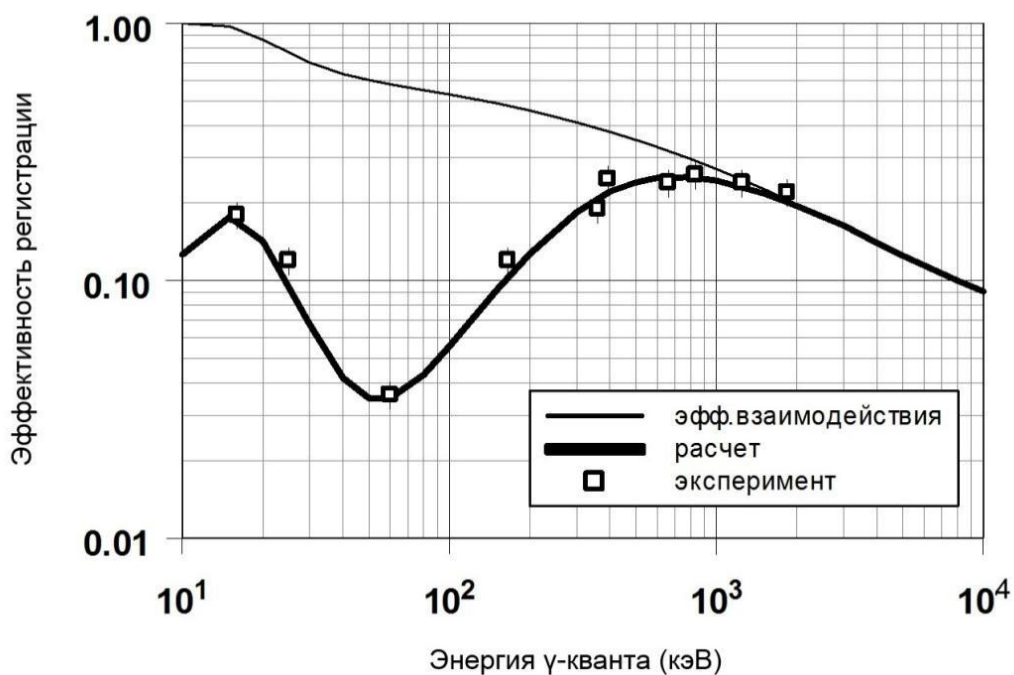


Рис. 26. Эффективность регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий от 18 кэВ до 1.8 МэВ с помощью прототипа сцинтилляционного транспортного портала с толщиной 5 см и значением $\omega = 23 \text{ ф.э./МэВ}$. Порог регистрации 0.2 ф.э.

6. Измерения временного разрешение сцинтилляционных детекторов

Вопрос временного разрешение детектора играет важную роль, особенно если планируется его использование в триггерной схеме [23]. Стоит отметить, что при использовании детектора в триггерной схеме речь идет о временном разрешении усредненном по всей площади детектора, т.к. обычно информация о координате прохождения частицы становится доступной только на стадиях реконструкции.

6.1. Вычисление собственного временного разрешения

Для определения собственного временного разрешения исследуемого счетчика S_H необходимо иметь как минимум два запускающих счетчика (S_1, S_2), один из которых будет времязадающим. Временное разрешение системы триггерных счетчиков $S_1 S_2$, т.е. распределение времени срабатывания счетчика S_2 относительно S_1 , описывается Гауссианом с разрешением σ_{tr} ,

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_{S_1}^2 + \sigma_{S_2}^2 \quad (8)$$

где $\sigma_{S_1}, \sigma_{S_2}$ — собственные временные разрешения счетчиков S_1 и S_2 соответственно.

Аналогичным образом можно записать еще два уравнения с разрешением исследуемого счетчика относительно запускающих счетчиков S_1 и S_2 ($\sigma_{S_H S_1}$ и $\sigma_{S_H S_2}$). После решения системы из трех уравнений получаем собственное временное разрешение исследуемого счетчика:

$$\sigma_{S_H} = \sqrt{\frac{(\sigma_{S_H S_1}^2 + \sigma_{S_H S_2}^2 - \sigma_{tr}^2)}{2}} \quad (9)$$

6.2. Стенд для измерений на космических мюонах

Схема стенда для измерений с космическими мюонами показана на рис. 27. Сигналы с триггерных счетчиков S_1 и S_2 , размером $85 \times 85 \times 10$ мм³, поступают на дискриминатор, и совпадения сформированных сигналов вырабатывают триггер для запуска временных и амплитудных преобразователей (см. триггерную схему на рис. 28). При этом сформированный сигнал со счетчика S_1 задержан на 10 нс относительно сигнала с счетчика S_2 , таким образом счетчик S_1 является времязадающим.

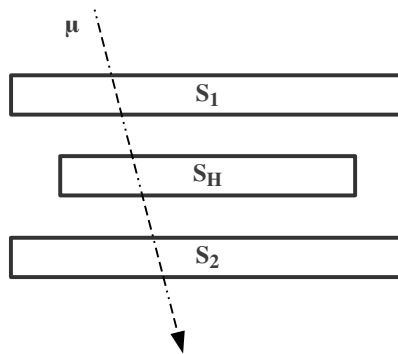


Рис. 27. Схема расположения счетчиков на стенде при измерениях на космических мюонах
 S_1, S_2 - запускающие сцинтилляционные счетчики $85 \times 85 \times 10 \text{ мм}^3$
 S_H - исследуемый счетчик.

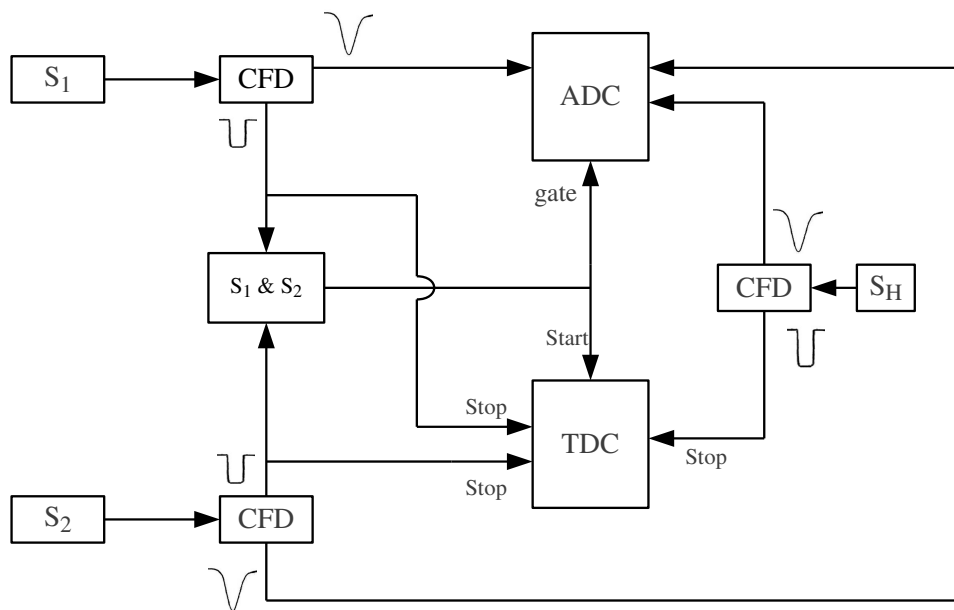


Рис. 28. Блок-схема триггерной и регистрирующей электроники.

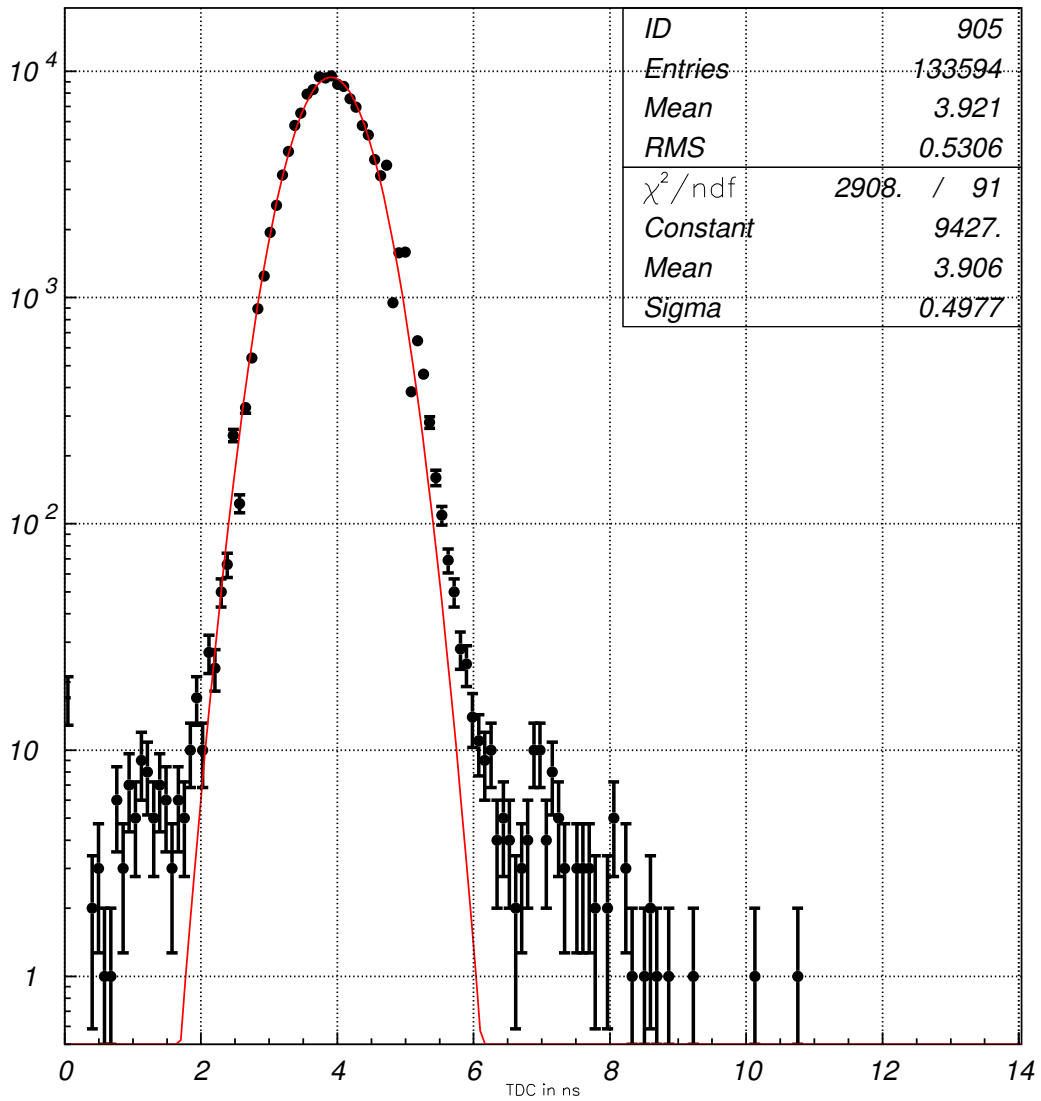


Рис. 29. Временное разрешение системы пучковых счетчиков — временной спектр полученный при использовании в качестве сигнала СТАРТ — сигнал запускающего счетчика S_1 , а в качестве сигнала СТОП - сигнал счетчика S_2 .

Временное разрешение пары запускающих счетчиков σ_{tr} представлено на рис. 29 и составляет 500 ± 5 пс. Таким образом собственное временное разрешение запускающих счетчиков, при условии их тождественности, составляет $500/\sqrt{2} \approx 350$ пс.

Использовались сцинтилляторы: BC-408 и образцы сцинтилляторов, изготовленные в ИФВЭ методом крупноблочной полимеризации и плавлением полистирольных гранул в форме. Все три образца имели одинаковые размеры: $150 \times 150 \times 20$ мм³ с девятью канавками для WLS волокон (расстояние между канавками 15 мм). В качестве фотоприемника использовался кремниевый фотоумножитель (SiPM) MicroFB-60035 с чувствительной областью 6×6 мм² производства SensL (Ирландия). Квантовая эффективность кремниевого фотоумножителя приведена на рис. 30.

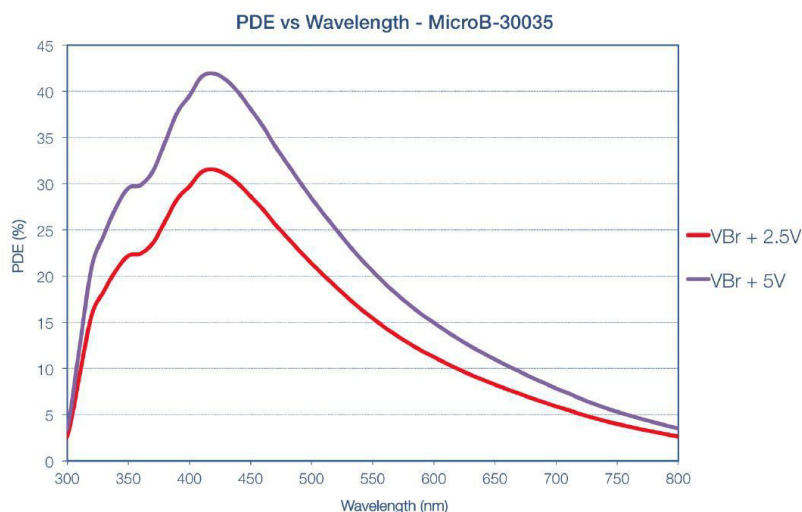


Рис. 30. Квантовая эффективность кремниевых фотоумножителей.

Рассмотрены два варианта светосбора, схематично представленные на рис. 31 — прямой светосбор с грани сцинтиллятора и светосбор с WLS волокон BCF-92 $\varnothing 1$ мм длиной 40 см, имеющих время высвечивания всего 2.7 нс. При светосборе с помощью WLS волокон, из-за заметно меньшего количества света использовался дополнительный каскад усиления сигналов с SiPM.

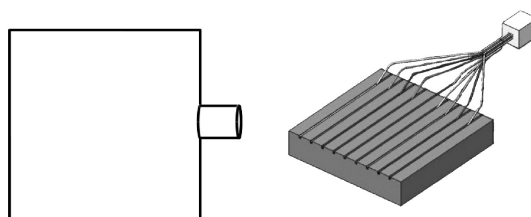


Рис. 31. Рассмотренные варианты светосбора: с грани сцинтиллятора (слева) и светосбор с помощью WLS волокон BCF-92 $\varnothing 1$ мм (справа).

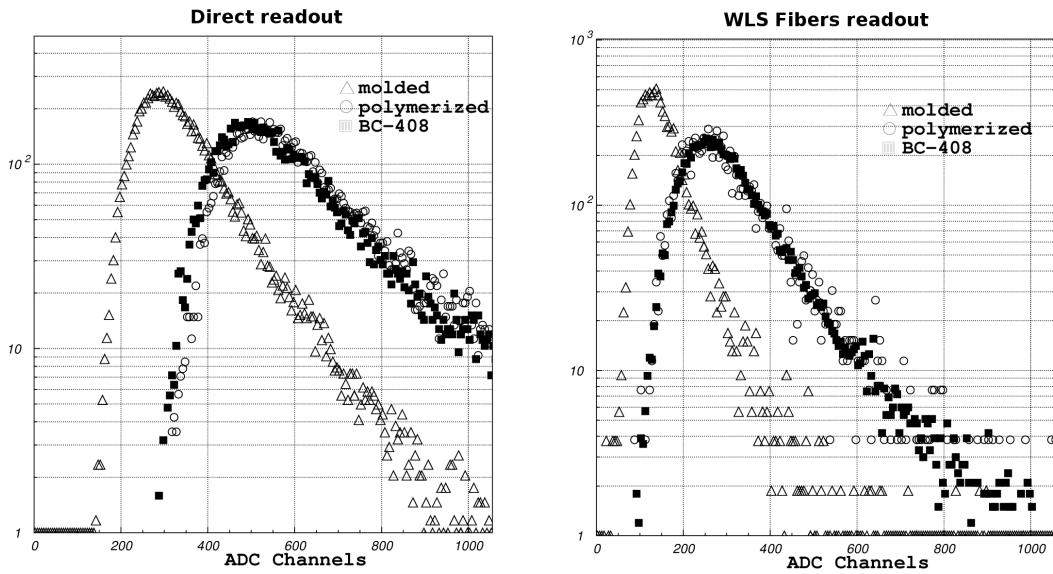


Рис. 32. Амплитудные спектры для трех типов сцинтиллятора. квадраты – BC-408; полые треугольники – сплавленный; полые круги – полимеризованный. Представлены амплитудные спектры полученные при светосборе с грани сцинтиллятора (слева) и светосборе с помощью WLS волокон BCF-92 $\varnothing 1$ мм (справа).

Полученные сравнительные данные представлены в Таблице 13.

Таблица 13. Временное разрешение образцов сцинтиллятора при прямом светосборе и светосборе с помощью WLS волокон BCF-92.

Сцинтиллятор	Временное разрешение σ , пс	
	Прямой светосбор	Светосбор с WLS волокон
BC-408	260 ± 5 пс ~ 140 ф.э.	600 ± 5 пс ~ 23 ф.э.
Полимеризованный	300 ± 5 пс ~ 145 ф.э.	715 ± 15 пс ~ 23 ф.э.
Сплавленный	335 ± 5 пс ~ 82 ф.э.	900 ± 5 пс ~ 13 ф.э.

На рис. 33,34 представлено временное разрешение, усредненное по площади запускающих счетчиков (85×85 мм²), трех рассмотренных образцов сцинтиллятора при прямом светосборе и светосборе с помощью WLS волокон BCF-92.

Над каждой гистограммой приведено два значения:

σ_{FIT} — относительное временное разрешение, полученное в результате фитирования временного спектра;

σ_{CAL} — собственное временное разрешение — результат решения уравнений(9).

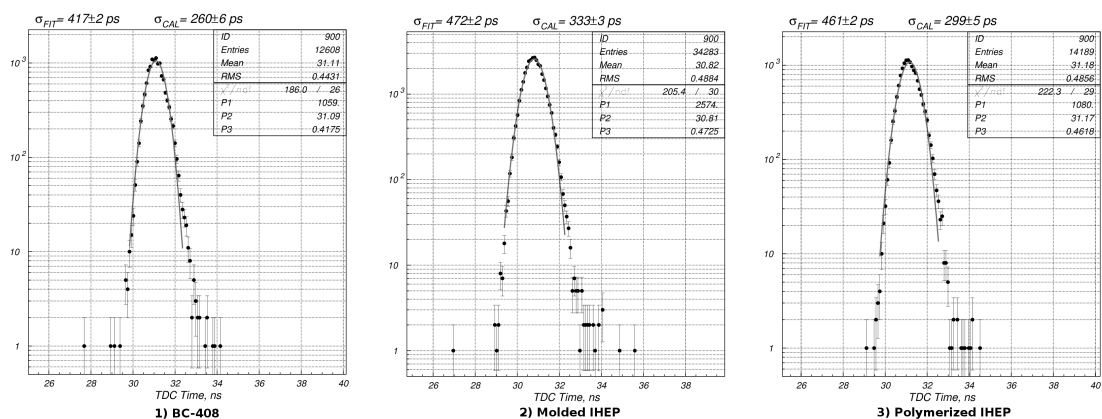


Рис. 33. Временное разрешение образцов при прямом светосборе. В качестве сигнала СТАРТ использовался триггерный счетчик S_1 , а в качестве сигнала СТОП использовался сигнал с кремниевого фотоумножителя установленного на грань исследуемого образца изготовленного из 1) BC-408; 2) произведенного в ИФВЭ методом плавления в форме; 3) произведенного в ИФВЭ методом крупноблочной полимеризации;

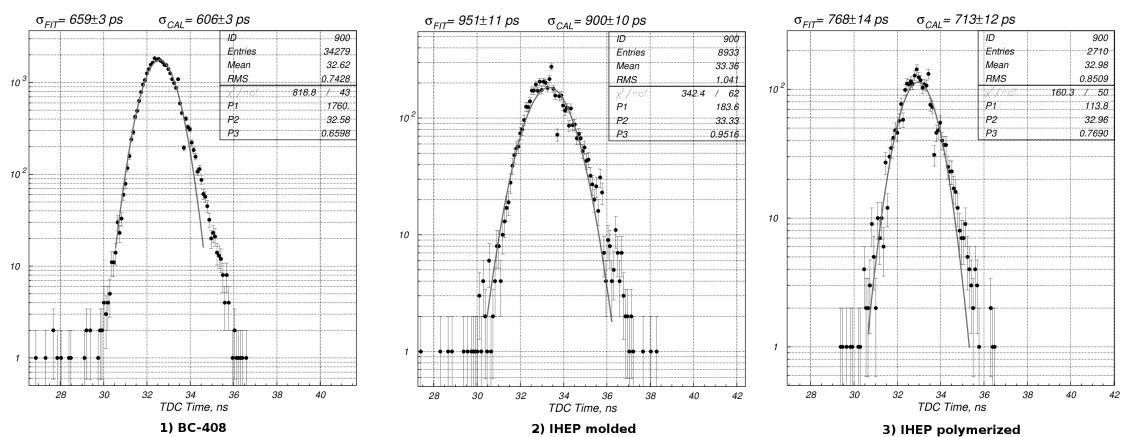


Рис. 34. Временное разрешение при светосборе с помощью WLS волокон BCF-92. В качестве сигнала СТАРТ использовался триггерный счетчик S_1 , а в качестве сигнала СТОП использовался сигнал с кремниевого фотоумножителя установленного на грань исследуемого образца изготовленного из 1) BC-408; 2) произведенного в ИФВЭ методом плавления в форме; 3) произведенного в ИФВЭ методом крупноблочной полимеризации;

7. Основные результаты и выводы

В ходе работы были проведены измерения основных характеристик пластмассовых сцинтилляторов, разработанных и изготовленных в ИФВЭ. Световыход наших базовых сцинтилляторов практически эквивалентен высококачественным зарубежным аналогам при значительно более низкой стоимости. Такая же ситуация наблюдается для систем сцинтилляторов — WLS волокна, которые изучены более подробно.

Выявлены следующие особенности использования систем сцинтилляторов — WLS волокна:

— затухание света в системе СЦ — WLS волокно целиком определяется параметром затухания света в WLS волокне: Λ_{WLS} , а не в сцинтиллятора $\Lambda_{СЦ}$, и в этом состоит принципиальное отличие от системы СЦ — ФЭУ;

— вклейка волокон в сцинтиллятор увеличивает светосбор примерно в 1.6 раза;

— измерения характеристик отражающих покрытий, используемых в системах СЦ — WLS волокно показало, что оптимальным отражающим покрытием (среди исследованных) является TYVEK.

Измерен также квантовый выход для системы сцинтиллятор — WLS волокно. При этом рассмотрено три метода расчета числа фотоэлектронов. Получен ряд зависимостей, таких как зависимость числа фотоэлектронов от количества WLS волокон и зависимость эффективности регистрации γ -квантов от энергии. Проведены измерения временного разрешения сцинтилляторов в варианте, как прямого светосбора, так и светосбора с помощью WLS волокон.

Использованные в работе методы позволяют определить необходимые характеристики сцинтилляторов, WLS волокон и детекторов на их основе.

Авторы выражают благодарность А.М. Зайцеву за поддержку данной работы, В.И. Рыкалину за ценные замечания, А.П. Солдатову и С.К. Черниченко за помощь в выполненных исследованиях и изготовлении образцов сцинтилляторов.

Работа выполнена в рамках Контракта № Н.4х.44.90.13.1118 от 31.05.2013г.

Список литературы

- [1] Т.В. Алимова и др., Характеристики сцинтилляционных полос, пластин и стержней для счетчиков частиц, изготовленных методом экструдирования. Препринт ИФВЭ 86-36, Серпухов (1986).
- [2] ИИЕР, Protvino. <http://www.ihep.ru/scint/bulk/product.htm>
- [3] ИИЕР, Protvino. <http://www.ihep.ru/scint/mold/product.htm>
- [4] Nuclear Enterprises Ltd (was acquired by Saint-Gobain in 1995).
- [5] Saint-Gobain Crystals www.detectors.saint-gobain.com
- [6] НТК «Институт монокристаллов» www.Amcrys-H.com

- [7] KURARAY Co., LTD <http://www.kuraray.co.jp/en/>
- [8] Г.И. Бритвич и др. Новые тяжелые сцинтилляторы для гетерогенных электромагнитных калориметров. ПТЭ.1999. № 4. С. 83-91. G.I.Britvich et al., NIM. A 469 (2001), 77-88.
- [9] E. Browne and R.B. Firestone. Table of Radioactive Isotopes. J. Wiley & Sons, Inc., New York(1986)
- [10] В.И. Машкович, А.В. Кудрявцева. Защита от ионизирующих излучений: Справочник-М.: Энергоатомиздат,1995.
- [11] J.H. Hubbel. Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV. Int. J. Appl. Radiat. Isot. Vol.33, pp.1269 to 1290, 1982
- [12] C.E. Moss et al. Neutron detectors for active interrogation of highly enriched uranium. IEEE Trans. on Nucl. Science, Vol.51, No4. August 2004.
- [13] R.C. Smith et al. System to detect contraband in cargo containers using fast and slow neutron irradiation and collimated gamma detectors. Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. B99(1995)733-735.
- [14] E.B. Norman et al. Signatures of fissile materials: high-energy γ rays following fission. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A521(2004)608610.
- [15] В.Л. Ромаданов и др. Обнаружение делящихся материалов в установках с импульсными нейтронными источниками. – Атомная энергия, 2006,т.101,вып.2,с.125-130
- [16] А.И. Лайкин, Ю.А. Платовских. Оптимальная обработка информации от детекторов, используемых для обнаружения взрывчатых веществ методом нейтронно-радиационного анализа. Атомная энергия, 2006,т.101,вып.5,с.379-387.
- [17] R. Wojeik et al. Embedded waveshifting fiber readout of long scintillators. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 342(1994)416-435.
- [18] L.S. Peak, P. Soler. Assessment of the photoelectron number for photomultipliers under conditions of low light intensities. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 301(1991)341-349.
- [19] R. Bollmann et al. Few electron response and spurious background of liner focused photomultipliers. Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. A342(1994)466-472.
- [20] M. Moszynski et al. Properties of the YAP: Ce scintillator. Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. A 404(1998)157-165.
- [21] S. Aota et al. Mass production of tile/fiber units for the CDF plug upgrade EM calorimeter. Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. A 420(1999)48-61.

- [22] А.Н. Перцев, А.Н. Писаревский. Одноэлектронные характеристики ФЭУ и их применение. М., Атомиздат, 1971.
- [23] А.И. Макаров и др. Исследование временных характеристик счетчиков триггерного годоскопа заряженных частиц для эксперимента NA62, Препринт ИФВЭ 2013-18.
- [24] Дж. Биркс, Сцинтилляционные счётчики. Изд. Иностранной литературы, Москва, 1955, стр 130.
- [25] Г.И. Бритвич, А.П. Солдатов, С.К. Черниченко, Ю.В. Гилицкий. Сцинтилляционный портал для обнаружения радиоактивных объектов в транспортных потоках. Патент № 86322 от 27.08.2009 г.

Рукопись поступила 12 декабря 2013 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Г.И. Бритвич и др.

Основные характеристики полистирольных сцинтилляторов производства ИФВЭ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л^AT_EX**.

Подписано к печати 20.12.2013. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 2,63. Уч.-изд.л. 3,84. Тираж 80. Заказ 4. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649